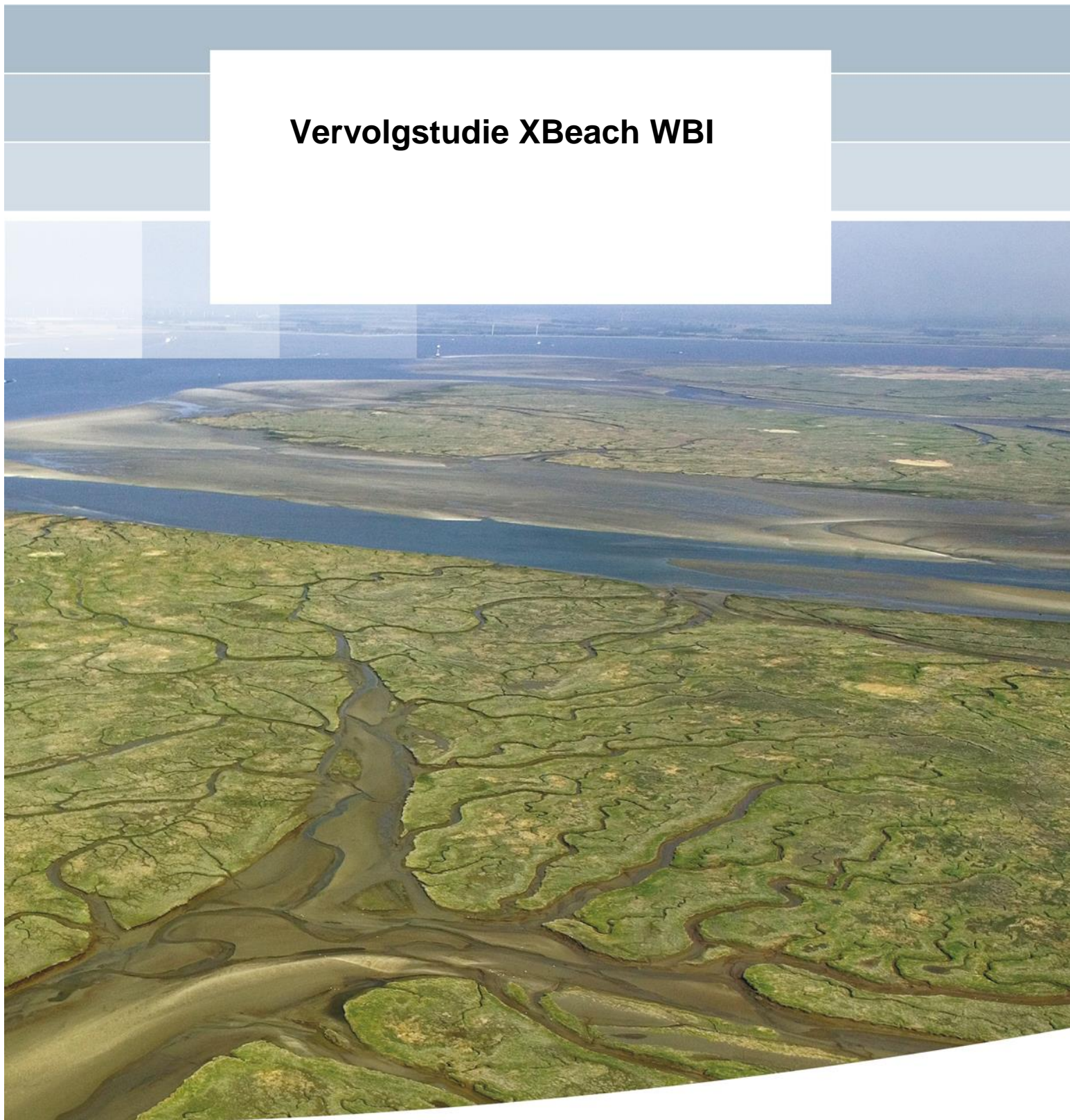


Vervolgstudie XBeach WBI



Vervolgstudie XBeach WBI

Robert McCall
Robbin van Santen
Henk Steetzel
Menno de Ridder
Ap van Dongeren

Titel
Vervolgstudie XBeach WBI

Opdrachtgever RWS/WVL	Project 11203720-013	Kenmerk 11203720-013-GEO-0002	Pagina's 83
---------------------------------	--------------------------------	---	-----------------------

Trefwoorden
Duinafslag, Kust, Duinen, Dijken, Deltagoot, XBeach, SWAN, PC-Overslag

Samenvatting

In 2006 zijn Deltagoot proeven uitgevoerd om het effect van golfperiode op duinafslagvolumes te bepalen. Deze afhankelijkheid is op basis van deze metingen verwerkt in Duros+. Echter, uit de Deltares/Arcadis (2018) analyse blijkt dat het effect volgens de theorie groter zou moeten zijn. Het doel van dit project is om te onderzoeken wat het verschil is tussen de metingen en de theorie en wat de consequenties zijn voor duinafslag middels een gevoeligheidsanalyse met een werkversie van Duros+. Het resultaat van deze studie is dat het verschil te verklaren is uit het feit dat een deel van de gebonden lange golf energie niet opgewekt is vanwege de beperking van de slag van het golfschot. Daarnaast blijkt uit een analyse met XBeach dat de diepte waarop de indicatieve golfbrandvoorwaarden worden opgelegd van invloed is op de afslag. Op basis van deze analyse is een werkversie van Duros+ gemaakt waarin de mate golfperiode afhankelijkheid is aangepast. Uit toepassing van dit werkmodel op diverse duinprofielen blijkt dat de afslag gemiddeld 15 tot 20 % (oftewel orde 20 meter extra afslag) kan toenemen ten opzichte van de huidige situatie, waarbij het effect van richtingsverspreiding niet meegenomen is.

Ten laatste is het effect van het laagfrequente deel van het golfspectrum op golfoverslag op dijken onderzocht met XBeach (dat laagfrequente golven meeneemt) en SWAN (dat dat niet doet). Hieruit blijkt dat aanzienlijke verschillen (O(0,1) l/s/m) in het berekende overslagdebiet kunnen ontstaan op dijken met een diepe teen en hoge kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities. De verschillen worden groter voor dijken met een lagere kruin (relatief ten opzichte van de golfcondities) en kunnen kritiek zijn voor het bepalen van overslagdebiet in het bereik 1–10 l/s/m.

Referenties

KPP BOI 2019 11203720

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	juli. 2019	Robert McCall Robbin van Santen Henk Steetzel Menno de Ridder Ap van Dongeren		Marcel van Gent		Leo Voogt	
0.2	Sept. 2019	Robert McCall Robbin van Santen Henk Steetzel Menno de Ridder Ap van Dongeren		Marcel van Gent		Leo Voogt	

Status
definitief

Inhoud

Lijst van Tabellen	iii
Lijst met Figuren	v
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel van de studie	1
1.3 Leeswijzer	1
2 Periode effect Deltagootproeven	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Probleemstelling	4
2.3 Achtergrond	4
2.3.1 Deltagootproeven 2006	4
2.3.2 Lange golven	5
2.3.3 Golfschotsturing	7
2.3.4 Werkgebied	8
2.4 Aanpak	9
2.5 Resultaten	10
2.5.1 Vergelijking gebruikte theorie	10
2.5.2 Vergelijking tussen het gewenste, vooraf berekende en voorbereekte stuursignaal	10
2.5.3 Verschillen tussen het uitgestuurde signaal en de gemeten schotbeweging	16
2.5.4 Gemeten spectra nabij het golfschot	18
2.6 Analyse gebonden en vrije golven	19
2.7 Effect van diepte offshore rand op lange golftransformatie en duinslag	25
3 Consequentieanalyse toename afslag	29
3.1 Inleiding en achtergronden	29
3.2 Implementatie periode-effect in het kernmodel	30
3.2.1 Inleiding	30
3.2.2 Oorspronkelijke formulering (1984)	30
3.2.3 Aangepaste formulering (2006)	32
3.3 Effect van golfperiode op afslaghoeveelheden	33
3.3.1 Inleiding	33
3.3.2 Resultaten gootproeven	33
3.3.3 Resultaten modelberekeningen	35
3.3.4 Resultaat heranalyse H4357-gootproeven	36
3.4 Algemene formulering periode-effect	36
3.4.1 Inleiding	36
3.4.2 Oorspronkelijke afleiding (2006)	37
3.4.3 Herziene afleiding afslagtoename	38
3.4.4 Bepaling aangepaste α -waarde t.b.v. gevoeligheidsanalyse	44
3.4.5 Validatie gebruik α -relatie	45
3.5 Bepaling aangepast rekenmodel t.b.v. gevoeligheidsanalyse	47
3.5.1 Deterministisch	47
3.5.2 Probabilistisch	47

3.6 Voorbeelddoorrekeningen	47
3.6.1 Inleiding	47
3.6.2 Beschouwde dwarsprofielen en randvoorwaarden	47
3.6.3 Detailresultaten duinafslagsommen	48
3.6.4 Overzicht resultaten afslaghoeveelheden en -afstanden	53
3.7 Consequenties gevoeligheidsanalyse	56
4 Golfoverslag zeedijken	57
4.1 Inleiding	57
4.2 Methodologie	57
4.2.1 Geschematiseerd zeedijkprofiel	58
4.2.2 Randvoorwaarden	59
4.2.3 Opzet SWAN model	60
4.2.4 Opzet XBeach model	61
4.2.5 Opzet PC-Overslag model	62
4.3 Resultaten onderzoeksvraag 1	63
4.4 Resultaten onderzoeksvraag 2	66
4.4.1 Analyse diepte voorland	67
4.4.2 Analyse kruinhoogte en diepte voorland	68
4.5 Discussie	71
5 Conclusies en aanbevelingen	73
5.1 Periode-effect Deltagootproeven	73
5.2 Consequenties voor beoordeling en ontwerp	74
5.3 Golfoverslag zeedijken	75
6 Referenties	77

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Gebonden golfhoogten(m) bepaald uit het met Auke berekende golfsignaal voor de drie proeven, en verschillende frequentiebanden. De reductiefactor is de verhouding tussen de golfhoogte tussen de cutoff frequentie en de halve piekfrequentie en de golfhoogte van de nul frequentie tot de halve piekfrequentie.	15
Tabel 3.1	Overzicht relevant modelonderzoek effect golfperiode op mate van duinafslag.	34
Tabel 3.2	Overzicht relevante gootproeven M1819-I-onderzoek (Opm.:*) Sterk afwijkende waarde) (Waterloopkundig Laboratorium, 1982).	34
Tabel 3.3	Overzicht gidsproeven H4265-onderzoek (WL Delft Hydraulics, 2004)	35
Tabel 3.4	Overzicht relevante rekenmodellen.....	36
Tabel 3.5	Overzicht modellen als functie van α -waarde in formulering afslagprofiel.	37
Tabel 3.6	Resultaat gemeten toename afslaghoeveelheden op basis van H4357-proeven (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b).	37
Tabel 3.7	Resultaat gebruik w12b-optie met een α -waarde van 0,45 (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b).	38
Tabel 3.8	Resultaten DurosTA-berekeningen (Deltares/Arcadis, 2018).	40
Tabel 3.9	Resultaten XBeach-berekeningen met default-settings voor zowel de ondiep als de diepwateraansturing, waarbij de voor de ondiep water aansturing gegeven waarden in Figuur 3.4 zijn gebruikt (Deltares/Arcadis, 2018), (Deltares, 2019b).	40
Tabel 3.10	Resultaten XBeach-berekeningen met VThdV-settings (Deltares, 2019b).	41
Tabel 3.11	Gebruikte bronnen voor maatgevende verhouding.	43
Tabel 3.12	Overzicht te beschouwen dwarsprofielen inclusief hydraulische randvoorwaarden (cf. Tabel 6.5 uit (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2007)).	48
Tabel 3.13	Overzicht resultaten berekende afslaghoeveelheden in oude en nieuwe situatie, inclusief absolute en relatieve verschillen (uitgaande van $\alpha = 0,95$). (n.b.: niet beschikbaar).	54
Tabel 3.14	Overzicht resultaten berekende afslagafstanden in oude en nieuwe situatie, inclusief absolute en relatieve verschillen (uitgaande van $\alpha = 0,95$).	55
Tabel 3.15	Overzicht resultaat verkennende berekeningen op afslagkarakteristieken (uitgaande van $\alpha = 0,95$).	56
Tabel 4.1	Diepwater randvoorwaarden op basis van HR2006.	60
Tabel 4.2	Golfstatistieken bij de teen van de dijk (1350 m) en berekende overslag volumes (in l/s/m). De spectrale karakteristieken voor de XBeach sommen zijn berekend op basis van alleen de inkomende component. Overslagdebieten kleiner dan 0,03 l/s/m worden grijs en tussen haakjes weergegeven, daar zij effectief als “nul” overslagdebiet gezien kunnen worden (EurOtop, 2018).	64

- Tabel 4.3 Golfstatistieken bij de teen van de dijk (1350 m) en berekende overslagdebieten voor verschillende voorlandconfiguraties. De spectrale karakteristieken voor de XBeach sommen zijn berekend op basis van alleen het inkomende component. Overslagdebieten kleiner dan 0,03 l/s/m worden grijs en tussen haakjes weergegeven, daar zij effectief als “nul” overslagdebiet gezien kunnen worden (EurOtop, 2018). De resultaten in de bovenste twee rijen komen overeen met de resultaten van de simulaties van Onderzoeksvraag 1.68
- Tabel 4.4 Berekende overslagdebieten (in l/s/m) voor verschillende voorlandconfiguraties en kruinhoogtes. De spectrale karakteristieken voor de XBeach sommen zijn berekend op basis van alleen de inkomende component. Overslagdebieten kleiner dan 0,03 l/s/m worden grijs en tussen haakjes weergegeven, daar zij effectief als “nul” overslagdebiet gezien kunnen worden (EurOtop, 2018).71

Lijst met Figuren

Figuur 2.1	Korte (Hrms,HF) en lange (Hrms,LF) golfhoogte over het dwarsprofiel in de Deltagoot 2006 proeven voor T01 (met $T_p=4.9$ s), T02 (met $T_p=6.12$ s) en T03 (met $T_p=7.35$ s). Metingen (zwart) en XBeach geforceerd met gemeten golfsignaal (rood) en Pierson-Moskowitz spectrum op basis van de Herbers (1994) theorie (blauw).	4
Figuur 2.2	Initieel profiel Deltagoot 2006 proeven (zwarte lijn), en de instrumentatie met waterstandsmeters (rode ruiten), druksensors (blauwe driehoeken) en snelheidsmeters (groene bollen) (uit: van Gent et al. (2008)).	5
Figuur 2.3	Gebonden golfspectra (stippellijnen) berekend met de theorie van Herbers (1994) behorende bij de Pierson-Moskowitz spectra voor de drie testen T01, T02 en T03	6
Figuur 2.4	Gebonden lange golf (en hogere harmonische) spectrum voor een gegeven korte golfspectrum (stippel lijn) en voor verschillende waarden van de richtingsspreiding. "Geen richtingsspreiding" (wat overeenkomstig de laboratoriumsituatie is) is aangegeven met $\sigma_\theta = 0$	7
Figuur 2.5	Ontwerpgrafiek op basis van lineaire (eerste-orde) golftheorie voor de bepaling van maximaal mogelijke golfhoogten als functie van de periode in de Deltagoot bij een waterdiepte aan het schot van 4.5 m. De golfhoogte wordt beperkt door de golfsteilheid, diepte-gelimiteerd breken, het vermogen van de golfmachine en de slag van het golfschot. De groene lijn geeft de beperking aan voor het toepassen van tweede-orde sturing. De parameterwaarden van de drie Deltagootproeven zijn aangegeven met de drie sterren.	9
Figuur 2.6	Vergelijking lange golf energie voor twee verschillende theorieën: Herbers (blauw) zoals gebruikt in XBeach en Klopman van Leeuwen (rood) zoals gebruikt in Auke/generate. De totale gebonden golf energie en het laag-frequente deel ($f < f_p/2$) is als tekst weergegeven in de drie panelen.	10
Figuur 2.7	Stuursignalen in meter schotbeweging voor de drie proeven T01, T02, T03. Geplot zijn het voor de proef berekende stuursignaal (blauw), het voorbewerkte signaal (met clamping, om het schot te beschermen) (rood) en het voor dit rapport opnieuw gegenereerde signaal (groen). Verder zijn de maximale en minimale schotpositie aangegeven.	12
Figuur 2.8	Variantiedichtheidspectra voor de drie proeven T01, T02, T03 voor het hele frequentie domein en ingezoomd op het laagfrequentie deel. Geplot zijn de spectra van het voor de proef berekende stuursignaal (blauw), het voorbewerkte signaal (met clamping, om het schot te beschermen) (rood) en het voor dit rapport opnieuw gegenereerde signaal (groen).	15
Figuur 2.9	Variantiespectra van het berekende stuursignaal (oranje) en de gemeten schotbeweging (blauw) voor de drie proeven T01, T02 en T03.	18
Figuur 2.10	Gemeten golfspectra voor de drie proeven. Links: totale golfspectra en rechts het laagfrequentie deel van de spectra. De getrokken lijnen zijn de metingen en de gestippelde lijnen de theorie.	19

Figuur 2.11	Gebonden en vrije golf in het ruimtelijke en tijds domein. Het linker paneel geeft de gebonden, stoor-golf en totale signaal weer in de ruimte. Het rechter paneel geeft de gebonden, stoorgolf en het totale signaal weer in het tijdsdomein ter plaatse van het golfschot.....	21
Figuur 2.12	Afstand-tijd diagram voor de gebonden golf (c_g) en vrije golf (c_{gh}) voor een frequentie van 0.025 Hz. Ter illustratie is ook de piek van het spectrum in het figuur weergegeven (c_{piek}).....	22
Figuur 2.13	Inhaallengte van de stoorgolf van de gebonden golf per frequentie getoond....	23
Figuur 2.14	Versterkingsfactor voor de drie proeven T01, T02 en T03 berekend per x-positie en frequentie.	24
Figuur 2.15	Model domein voor test T01. Als illustratie zijn de instantane korte en lange golven ook weergegeven. De locatie van de offshorerand verschilt per test.....	25
Figuur 2.16	Xbeach resultaten voor de verschillende proeven T01, T02 en T03 (van boven naar onder). Het linker paneel laat de kort golf energie zien en het rechter paneel de lange golven voor de drie varianten van aansturing: met het gemeten golfsignaal (rood), met het PM spectrum op 4.5 meter (blauw) en met het PM spectrum op dieper water (14.5 m) (geel).	27
Figuur 2.17	Afslag volume voor de drie testen en de verschillende varianten.....	28
Figuur 3.1	Basisformulering afslagprofiel (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid/ENW, 2007).	31
Figuur 3.2	Afslagprofielen als functie van golfperiode T_p (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid/ENW, 2007).....	33
Figuur 3.3	Relatie tussen de grootte van de α -waarde en de relatieve toename in de hoeveelheid duinafslag voor het referentieprofiel met $H_s = 7,6$ m en $D_{50} = 240$ μ m, inclusief de basiswaarde.	38
Figuur 3.4	Het effect van golfperiode (T_p) variatie op erosievolumes met XBeach (geel) en DurosTA (groen). Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01, T02 en T03 in rode cirkels (Ref.: Figuur 2.7 in (Deltares/Arcadis, 2018)).....	39
Figuur 3.5	Overzicht beschikbare informatie over toename afslag bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapoleerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings).	42
Figuur 3.6	Overzicht beschikbare informatie over relatieve afslagwaarden bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapoleerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings).	42
Figuur 3.7	Overzicht beschikbare informatie over relatieve afslagwaarden bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapoleerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings), inclusief de resultaten van het M1819-I-onderzoek uit voor het lagere periodebereik.	43
Figuur 3.8	Relatie tussen de grootte van de α -waarde en de relatieve toename in de hoeveelheid duinafslag voor het referentieprofiel voor $H_s = 7,6$ m en $D_{50} = 240$ μ m.	44
Figuur 3.9	Effect van de α -waarde op de hoeveelheid duinafslag voor $H_s = 7,6$ m en $D_{50} = 240$ μ m.	45

Figuur 3.10	Effect van de α -waarde op de hoeveelheid duinafslag voor $H_s = 9,0$ m en $D_{50} = 200 \mu\text{m}$	45
Figuur 3.11	Overzicht beschikbare informatie over relatieve afslagwaarden bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapoleerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings), inclusief de resultaten van het M1819-I-onderzoek uit voor het lagere periodebereik en het uiteindelijke geïmplementeerde α -verband.....	46
Figuur 3.12	Vergelijking nieuwe relatie (met een α -waarde van 0,95) met het in vergelijking tot het vigerende verband (met een α -waarde van 0,45).....	46
Figuur 3.13	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor het referentieprofiel (P#00).....	48
Figuur 3.14	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#01.	49
Figuur 3.15	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#02.	49
Figuur 3.16	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#03.	49
Figuur 3.17	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#04.	50
Figuur 3.18	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#05.	50
Figuur 3.19	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#06.	50
Figuur 3.20	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#07.	51
Figuur 3.21	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#08.	51
Figuur 3.22	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#09.	51
Figuur 3.23	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#10.	52
Figuur 3.24	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#11.	52
Figuur 3.25	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#12.	52
Figuur 3.26	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#13.	53
Figuur 3.27	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#14.	53
Figuur 3.28	Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#15.	53

Figuur 3.29	Relatie tussen golfperiode en afslagtoename per beschouwde locatie, inclusief het geïmplementeerde verband voor het referentieprofiel, uitgaande van $\alpha = 0,95$ inclusief de van toepassing zijde spreiding.	54
Figuur 3.30	Relatie tussen golfperiode en afslagtoename per beschouwde locatie (uitgaande van $\alpha = 0,95$ inclusief de van toepassing zijde spreiding).	55
Figuur 4.1	Schematisatie van het JARKUS-profiel tot een representatief dwarsprofiel.	59
Figuur 4.2	SWAN profiel discretisatie.	61
Figuur 4.3	Boven: een instantane bovenaanzicht van het wateroppervlak met niet-langkammige golven (geen langsuniforme golfkammen) in het 2D XBeach NH model. Het zwarte punt geeft de uitvoerlocatie weer voor de teen van de dijk. Onder: het profiel in de dwarsrichting. Binnen de 2D berekening is dit profiel langs-uniform herhaald.	62
Figuur 4.4	Vergelijking van significante golfhoogteontwikkeling over het dwarsprofiel tussen SWAN en XBeach. De bandbreedte rond de XBeach sommen geeft de standaardafwijking van de significante golfhoogte weer, berekend over tijdblokken van 30 minuten.	64
Figuur 4.5	Vergelijking van de spectrale vorm tussen de drie modelaanpakken op 50 meter vanaf de zeewaartse rand (links) en op de teen van de dijk op 1350m vanaf de zeewaartse rand (rechts). Energie op frequenties kleiner dan f_{lower} (0,005 Hz) worden niet gebruikt voor de berekening van spectrale componenten.	65
Figuur 4.6	Variaties van het schematische referentieprofiel met verhoogde voorlanden (blauwe lijnen en teenpositie t.o.v. NAP in blauw) en verlaagde kruin (rode lijnen en kruinpositie t.o.v. NAP in rood). Ter verduidelijking is het dijkprofiel (met kruinverlagingen) alleen volledig weergegeven in combinatie met het referentievoorland; in de simulaties met een verhoogd voorland sluit het (referentie en verlaagde) dijkprofiel direct aan op het verhoogde voorland.	66
Figuur 4.7	Spectrale golfparameters aan de teen van de dijk en berekende overslagdebiëten in PC-Overslag voor simulaties met verschillende posities van de teen van de dijk en een dijk kruin op NAP + 14,50 m. De resultaten van de simulaties van Onderzoeksvraag 1 (met een diep voorland) zijn in bovenstaande figuren zwart omringd.	67
Figuur 4.8	Berekende overslagdebiëten op basis van SWAN en XBeach resultaten voor verschillende voorlandconfiguraties en kruinhoogten. De resultaten in het bovenste figuur komen overeen met die in Figuur 4.7 (Sectie 4.4.1; Analyse diepte voorland). Daarin zijn de resultaten van de simulaties van Onderzoeksvraag 1 (met een diep voorland) zwart omringd.	70
Figuur 4.9	Berekende overslagdebiëten ($l/s/m$) als functie van golfperiode en -hoogte voor een dijk met een hoge kruin (links; kruin 9,20 m boven SWL) en lage kruin (rechts; kruin 3,20 m boven SWL). De berekende golfcondities aan de teen van de dijk (Sectie 4.4.2) voor een voorland met een diepe teen (\blacktriangledown ; SWL - 4,55 m) en een ondiepe teen (\blacktriangle ; SWL - 0,55 m) met gebruik van SWAN (groen) en XBeach (rood) zijn ter illustratie toegevoegd aan de figuren. NB. door het afwijken van de golfopzet in dit figuur ten opzichte van de simulaties in Sectie 4.4.2, komen berekende overslagdebiëten niet precies overeen met Tabel 4.4.	72

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2018 heeft Deltares met Arcadis een Aanloopstudie XBeach uitgevoerd (Deltares/Arcadis, 2018, "Aanloopstudie XBeach WBI") waarin onderzocht is wat het gedrag van XBeach met betrekking is tot zowel duinafslag en golfoverslag ten opzichte van bestaande modellen is. Het doel is om vertrouwen in het XBeach-model te vergroten en ook richting te kunnen geven aan de planvorming om van XBeach een volwaardig in WBI opgenomen instrument te maken voor beoordeling en ontwerp van primair zandige waterkeringen.

Als vervolg hierop heeft RWS-WVL opdracht gegeven voor een vervolgstudie om een aantal aanbevelingen uit het rapport verder uit te werken. Deze betreffen:

1. Analyse periode effect in Deltagoot met consequentie analyse
2. Analyse effect laagfrequente deel golfspectrum op golfoploop en- overslag voor dijken
3. Opstellen Plan van Aanpak Duinen 2023

1.2 Doel van de studie

Het doel van deze studie is om bovengenoemde onderdelen 1 en 2 uit te werken. Het eerste aspect betreft de geconstateerde discrepantie tussen metingen uit 2006 in de Deltagoot, golftheorie en resultaten verkregen met XBeach. Deze analyse moet leiden tot een advies over de consequenties van het mogelijke onderschatten van het periode-effect in de Deltagootproeven van 2006 op duinafslag. Het tweede onderdeel betreft het onderzoeken van de consequenties van het meenemen van het laagfrequente deel van het spectrum in de bepaling van golfbelasting op dijken.

Het derde doel van deze studie is het Plan van Aanpak om van XBeach een beoordelingsinstrument voor duinwaterkeringen te maken in 2023. Dit Plan van Aanpak Duininstrumentarium is een afzonderlijk document.

1.3 Leeswijzer

De analyse van de discrepantie in opgelegde en realiseerde spectra in Deltagoot proeven van 2006 is uitgewerkt in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 wordt de consequentie van het onderschatten van het periode effect met de huidig rekenregel op de duinafslag uitgewerkt.

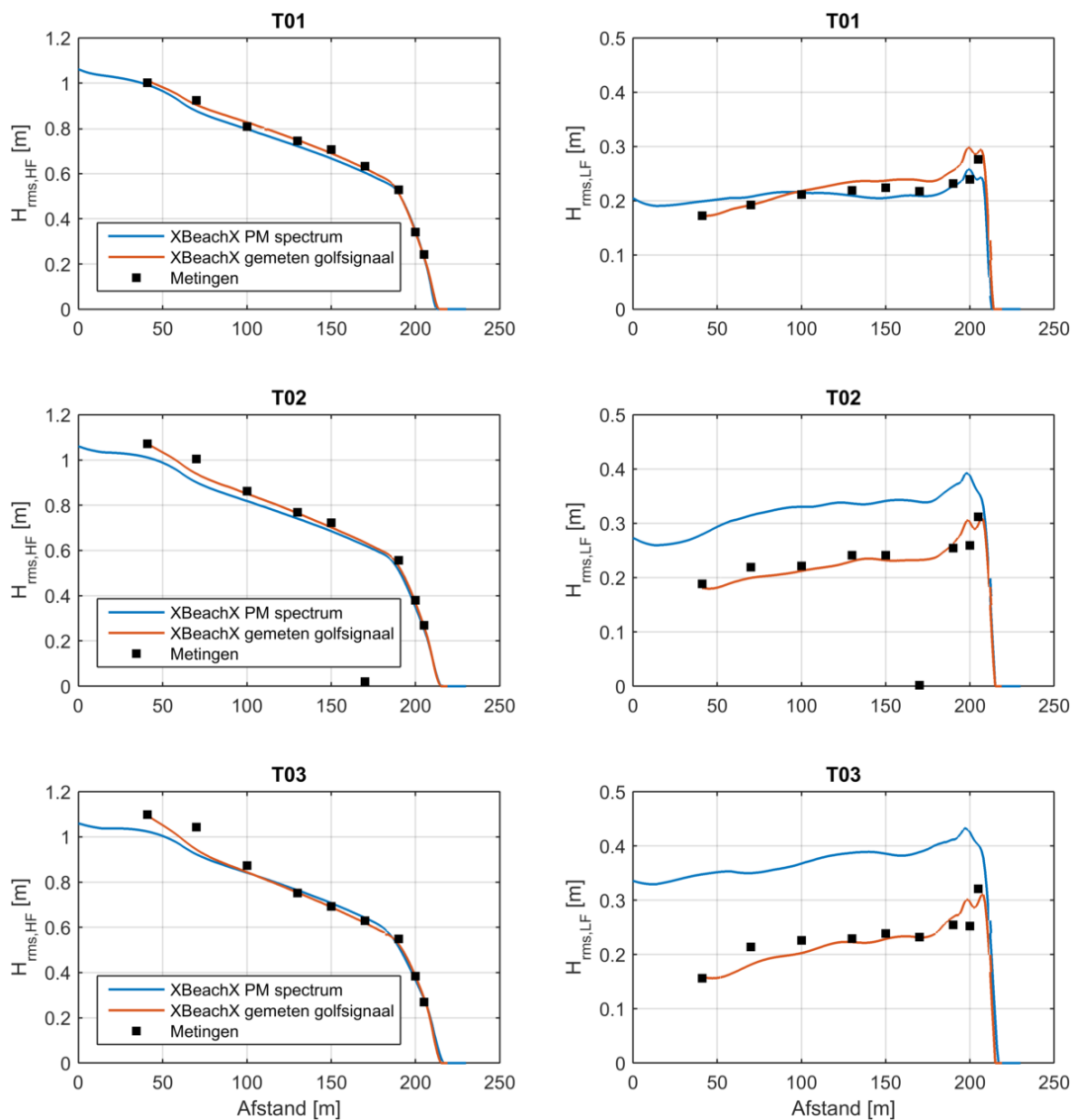
Ten slotte wordt in Hoofdstuk 4 een analyse gemaakt van het effect van het laagfrequente deel golfspectrum op golfoploop en- overslag op dijken. De conclusies per onderdeel staan in Hoofdstuk 5.

2 Periode effect Deltagootproeven

2.1 Inleiding

In 2006 zijn bij WL|Delft Hydraulics in De Voorst Deltagoot proeven uitgevoerd waarbij de golfperiode is gevarieerd. Naar verwachting werd de gemeten duinafslag groter bij een grotere periode en deze afhankelijkheid is op basis van deze metingen toegevoegd aan DUROS wat leidde tot DUROS++. Echter, uit de Deltares/Arcadis (2018) analyse blijkt dat het effect van de variatie van de golfperiode op de duinafslag volgens de gangbare theorie van Herbers et al (1994), die in XBeach is ingebouwd, veel groter zou moeten zijn. Volgens deze theorie zou de golfenergie in de lage frequenties veel meer zou moeten toenemen dan de metingen laten zien, zie Figuur 2.1 (Dit is Figuur 2.29 uit Deltares/Arcadis (2018)).

De beschrijvende tekst uit Deltares/Arcadis (2018) over deze figuur: "In Figuur 2.1 wordt de korte en lange golfhoogte over het dwarsprofiel weergegeven voor proeven T01, T02 en T03 (met $T_p = 4,9, 6,12$ en $7,35$ s respectievelijk). Het korte golfhoogte verloop is nagenoeg identiek voor metingen en XBeach, zowel geforceerd met gemeten golfsignaal als Pierson-Moskowitz spectrum. De lange golftransformatie in XBeach komt goed overeen met de metingen wanneer het gemeten golfsignaal wordt opgelegd. Echter, bij toename van de golfperiode T_p neemt de lange golfhoogte toe in XBeach (met Pierson-Moskowitz spectrum), terwijl deze in de metingen nagenoeg gelijk blijft. De verwachting op basis van de evenwichtstheorie is van Longuet-Higgins and Stewart (1962,1964) dat een grotere golfperiode leidt tot een toename van de lange golfhoogte. Dit is niet zichtbaar in de metingen. De hypothese is dat dit komt door een beperking in de slag van het golfschot, maar dit moet nader onderzocht worden. Een en ander zou bij direct gebruik van het meetresultaat voor de $7,35$ s proef tot een onderschatting van de prototype-erosie kunnen leiden. "



Figuur 2.1 Korte ($H_{rms,HF}$) en lange ($H_{rms,LF}$) golfhoogte over het dwarsprofiel in de Deltagoot 2006 proeven voor T01 (met $T_p=4.9$ s), T02 (met $T_p=6.12$ s) en T03 (met $T_p=7.35$ s). Metingen (zwart) en XBeach geforceerd met gemeten golfsignaal (rood) en Pierson-Moskowitz spectrum op basis van de Herbers (1994) theorie (blauw).

2.2 Probleemstelling

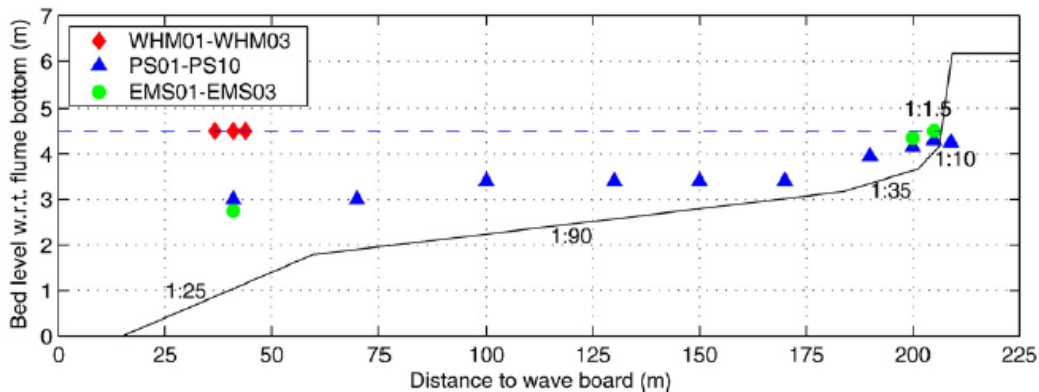
De probleemstelling luidt: wat verklaart het verschil tussen de in de goot gemeten lange golfhoogten en de door XBeach berekende lange golfhoogten.

2.3 Achtergrond

2.3.1 Deltagootproeven 2006

In 2006 is een grootschalig duinafslag experiment uitgevoerd in de Deltagoot (van Gent et al., 2008). Figuur 2.2 geeft een illustratie van het gebruikte beginprofiel gedurende het experiment. Tijdens proef T01 is het profiel blootgesteld aan golven met een hoogte (H_s) van 1.5 m en een periode (T_p) van 4.9 s. Het gemiddelde waterniveau gedurende het experiment was 4.5 (m)

boven de bodem van de goot bij het golfschot en de korreldiameter (D_{50}) $200 \mu\text{m}$. Voor proef T02 en T03 is alleen de golfperiode gevarieerd met een T_p van respectievelijk 6.12 en 7.35s. Na 0,1; 0,3; 1; 2,04; en 6 uur is het experiment stilgelegd om het profiel in de goot te meten. Het gedrag van met name de gebonden lange golven tijdens deze drie proeven is onderwerp van deze analyse.



Figuur 2.2 Initieel profiel Deltagoet 2006 proeven (zwarte lijn), en de instrumentatie met waterstandsmeters (rode ruiten), druksensors (blauwe driehoeken) en snelheidsmeters (groene bollen) (uit: van Gent et al. (2008)).

2.3.2 Lange golven

Een zeeoppervlak lijkt op het eerste gezicht een chaotisch samenspel van hoge en lage golven met verschillende golflengten. Het kan echter wiskundig opgevat worden als een optelling van afzonderlijke golfcomponenten, elk met zijn eigen amplitude, frequentie, fase en richting. Ruimtelijk gezien zijn op bepaalde plaatsen golfcomponenten in fase en versterken ze elkaar en is de resulterende golftop hoog, op andere plaatsen zijn golfcomponenten uit fase, dempen ze elkaar uit en is de golfhoogte laag. Dit geldt ook in de tijd: als op een vaste locatie zou worden gemeten dan worden opeenvolgingen van hoge en lage golven gemeten. Dit patroon wordt een golfgroep genoemd: “elke zevende golf is een hoge golf” is een bekende wijsheid. De golfgroepen planten zich voort met de groepssnelheid. De groepslengte is een orde (7 tot 10 keer) groter dan de individuele golflengte.

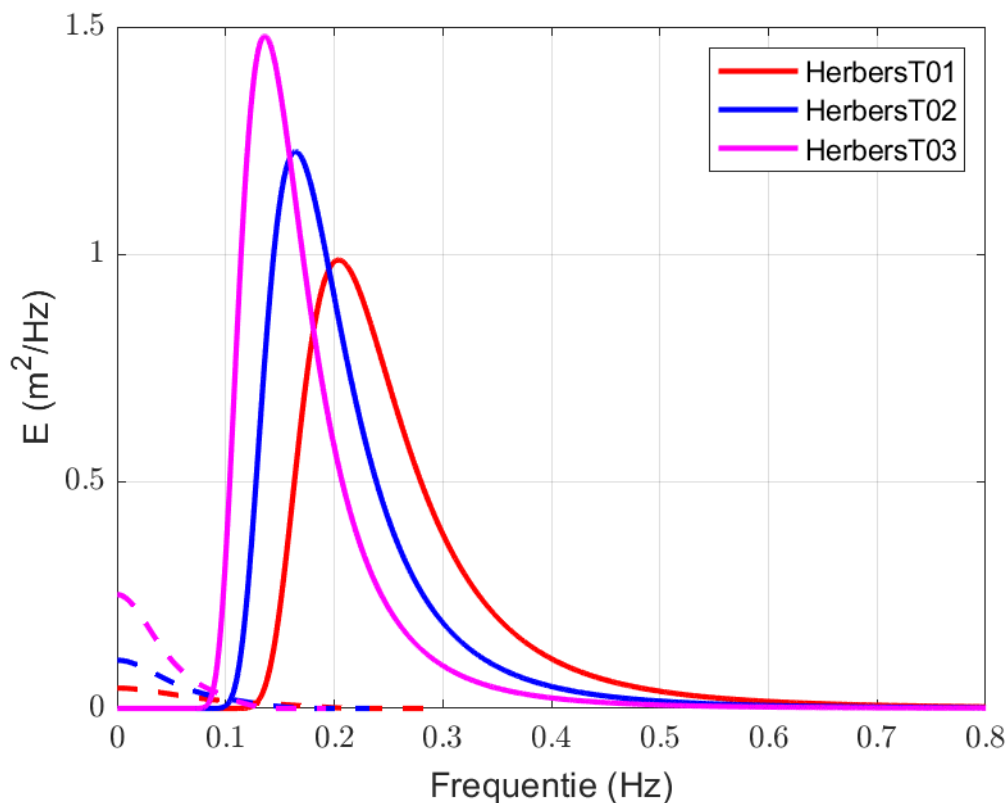
Een effect van deze golfgroepen is dat het gemiddelde zeeniveau ter plekke van een hoge golf iets naar beneden wordt gedrukt, alsof de hoge golf een hogedrukgebied is. Waar de golven laag zijn, komt het zeeniveau iets omhoog. Deze variatie van het zeeniveau heeft dezelfde lengte en periode als de golfgroepen loopt met de golfgroepen mee: ze is er aan “gebonden” zodat deze bewegingen “gebonden golven” (bound waves) worden genoemd.

De energie van de lange golf kan voor de evenwichtssituatie (strikt genomen voor een oneindig lange zee met constante waterdiepte) bepaald worden uit de theorie van Hasselman (1962). Deze is geherformuleerd door Longuet-Higgins and Stewart (1962, 1964) in termen van de radiation stress (de kracht die de golven op het wateroppervlak uitoefenen). Voor het bepalen van de zeerandvoorwaarden in XBeach wordt de op Hasselman gebaseerde uitdrukking van Herbers et al. (1994) gebruikt. Een uitgebreide beschrijving van deze methode staat in Van Dongeren et al. (2003), die hieronder samengevat is.

De Herbers methode beschouwt het korte golfveld als een serie golfcomponenten met elk zijn eigen amplitude, fase, frequentie en richting. Elk paar golfcomponenten interacteert met elkaar en genereert een gebonden golfcomponent. De frequentie van die golfcomponent is de

verschilfrequentie tussen de twee korte golfcomponenten. De fase van de gebonden golf is 180 graden verschoven ten opzichte van de som van de twee korte golffases en de amplitude is bepaald door het product van de amplitudes van de twee korte golfcomponenten en een interactiecoëfficiënt. Deze interactiecoëfficiënt is een functie van de frequentie van de twee componenten, hun verschilfrequentie, verschilhoek en de relatieve waterdiepte. Deze interactie wordt voor elk paar componenten berekend en daarna gesommeerd om tot het totale gebonden golfveld te komen.

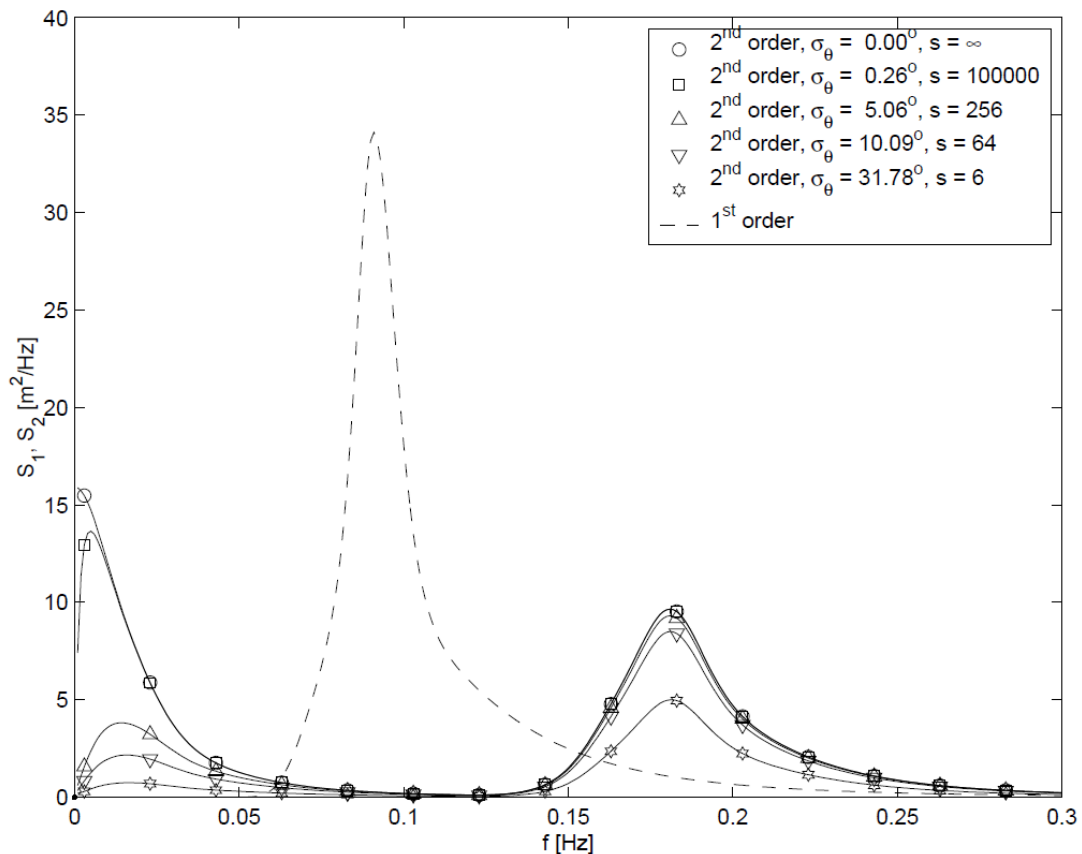
De uiteindelijke vorm van het gebonden golfspectrum is daarmee een functie van de waterdiepte, de golfhoogte, de piekperiode, de spectrale vorm en de richtingsverspreiding van de korte golven. Hoe ondieper, hoe langer de piekperiode, hoe hoger de korte golfhoogte, hoe nauwbandiger het kortegolfspectrum of hoe kleiner de richtingsverspreiding, hoe groter de energie in het gebonden golfspectrum. Dit kan als volgt gevisualiseerd worden voor de parameters van de drie golfproeven van de Deltagootproeven H4357 (Van Gent et al, 2008). Hier is te zien dat de inhoud onder de gebonden golfspectra (gestippelde lijnen) toeneemt met toenemende piekperiode.



Figuur 2.3 Gebonden golfspectra (stippellijnen) berekend met de theorie van Herbers (1994) behorende bij de Pierson-Moskowitz spectra voor de drie testen T01, T02 en T03.

Het gebonden golfspectrum laat in elk van de testen zien dat de energie toeneemt met afnemende frequentie. Voor proef T03 is er veel energie waar te nemen op uiterst lage frequenties en dus met lange golflengten. Dit is ook te verwachten omdat in het korte golfspectrum de componenten met de meeste energie dichtbij elkaar liggen en dus een kleine verschilfrequentie hebben. Het is ook te zien dat de spectrale inhoud sterk toeneemt als de periode groter wordt. Er dient opgemerkt te worden dat de interactie tussen de componenten maximaal is als de verschilhoek in de golfrichting klein is. In een laboratoriumgoot lopen alle componenten in dezelfde richting en is de interactie maximaal. Met enige mate van

richtingsverspreiding zoals die in het veld voorkomt neemt de gebonden golfenergie behoorlijk af (Figuur 2.4). Daarnaast daalt de gebonden golfenergie ook naar 0 bij 0 Hz terwijl de gebonden lange golf energie juist toeneemt richting 0 Hz bij situaties zonder richtingsverspreiding. Dit betekent dat golfcomponenten die in gelijke cq verschillende richting lopen een andere interactie hebben, waardoor de lange golfenergie minder wordt als de richtingsverspreiding toeneemt.



Figuur 2.4 Gebonden lange golf (en hogere harmonische) spectrum voor een gegeven korte golfspectrum (stippel lijn) en voor verschillende waarden van de richtingsverspreiding. “Geen richtingsverspreiding” (wat overeenkomstig de laboratoriumsituatie is) is aangegeven met $\sigma_\theta = 0$.

2.3.3 Golfschotsturing

In de Deltagoot worden golven opgewekt door het bewegen van een vertikaal golfschot. Dit golfschot wordt aangestuurd door middel van vooraf berekende stuursignalen. Dit zijn golfschotposities in meters ten opzichte van de middenstand van het schot en worden aangemaakt met het programma Auke/Generate (voorheen Multilin) (v7.05, de vigerende versie ten tijde van project H4357) op basis van de gewenste golfhoogte, golfperiode en spectrale vorm. Door de beweging van het golfschot worden golven opgewekt die door de goot naar het duin lopen en op diverse posities in de goot gemeten zijn. De meeste golfenergie dissipeert op het strand door golfbreking en bodemwrijving, maar een deel van de golven (met name de langere golven) reflecteert en bereikt het schot weer.

Zonder maatregelen zouden deze golven vanaf het schot weer de goot in reflecteren, re-reflecteren vanaf het strand, etc, en leidt tot gootslingeringen. Dit laboratoriumeffect is niet in overeenstemming met de natuur waar de van het strand gereflecteerde golven naar open water

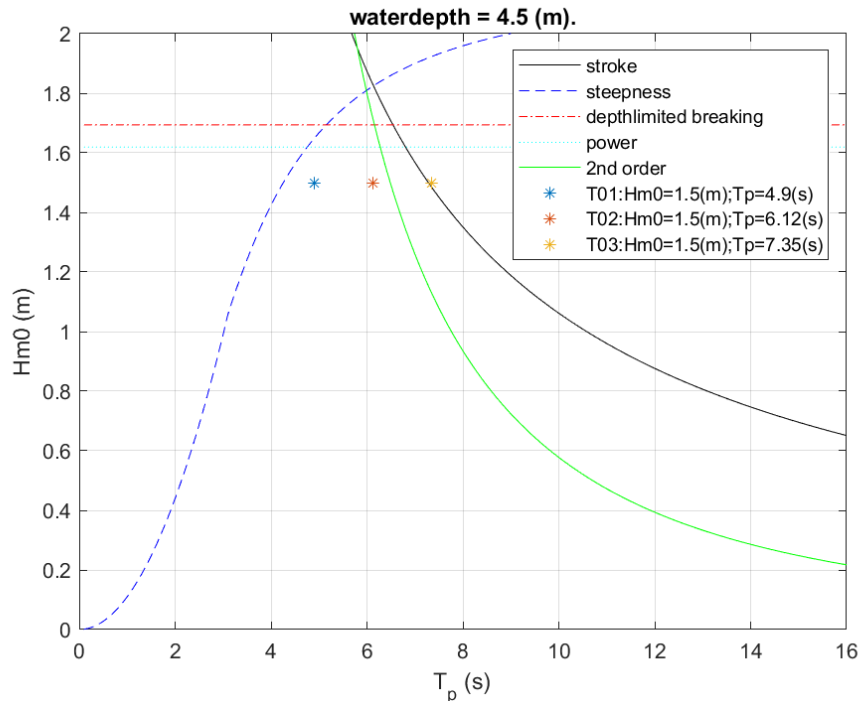
zouden moeten verdwijnen. Om de reflectie vanaf het schot te onderdrukken en zo de natuur zo goed mogelijk te benaderen wordt Actieve Reflectie Compensatie op het schot toegepast. Dit is een real-time algoritme dat de waterstand aan het schot meet en daarvan de verwachte waterbeweging van de uitgestuurde golf af trekt. Het verschil is dan de vanaf het strand gereflecteerde golf. Als de ARC een gereflecteerde golf detecteert, stuurt het een signaal naar het golfschot om een beweging te maken om de reflectie te dempen. In essentie wordt er een golf uitgestuurd met dezelfde hoogte en periode als de gedetecteerde golf maar met de tegengestelde fase, een anti-golf als het ware. De totale beweging van het golfschot is dus deels bepaald door het vooraf berekende stuursignaal dat er voor zorgt dat de gewenste golven worden uitgestuurd en deels door de ARC die de ongewenste golven dempt.

2.3.4 Werkgebied

Het golfschot kent een bepaald “werkgebied” (Figuur 2.5) die voor een gegeven waterdiepte de begrenzingen van de maximale significante golfhoogte aangeeft als functie van de golfperiode. De begrenzingen worden gevormd door de mechanische beperkingen van het golfschot en de fysica van het water:

- de maximale slag (“stroke”), die vooral een begrenzing vormt bij de langere perioden;
- de maximale golfsteilheid (“steepness”), vooral bij de kleinere perioden;
- diepte gelimiteerd breken (“depth-limited breaking”);
- vermogen van de machine (“power”).

Het werkgebied bevindt zich onder elk van de bovenstaande grenzen. Daarnaast zijn er nog aandachtsgebieden waar het golfschot de tweede-orde (gebonden) golven niet kan opwekken (“second order”). In de figuur zijn de gewenste combinaties T01, T02 en T03 geplot. Te zien is dat met name T03 op het randje van het werkgebied valt, door de beperking van de slag en boven de beperking voor het toepassen van tweede-orde golftheorie gaat.



Figuur 2.5 Ontwerpgrafiek op basis van lineaire (eerste-orde) golftheorie voor de bepaling van maximaal mogelijke golfhogten als functie van de periode in de Deltagoot bij een waterdiepte aan het schot van 4.5 m. De golfhogte wordt beperkt door de golfsteilheid, diepte-gelimiteerd breken, het vermogen van de golfmachine en de slag van het golfschot. De groene lijn geeft de beperking aan voor het toepassen van tweede-orde sturing. De parameterwaarden van de drie Deltagootproeven zijn aangegeven met de drie sterren.

Voordat een aangemaakt stuursignaal uitgestuurd wordt, wordt het gecontroleerd op het optreden van een schotpositie die groter is dan de maximale slag, maar ook op het optreden van te grote snelheden en versnellingen van het golfschot. Bij overschrijdingen wordt het signaal iets aangepast (gesmootht) met het “clamping” programma, dat bewegingen van het schot waarbij schade zou kunnen optreden moet voorkomen.

2.4 Aanpak

Om de probleemstelling te onderzoeken is eerst nagegaan wat de bronnen van de verschillen tussen de XBeach resultaten en de laboratoriummetingen zouden kunnen zijn.

De volgende mogelijke bronnen van verschil zijn geïdentificeerd:

- Verschil tussen de toegepaste gebonden golftheorie in XBeach en Auke/generate
- Verschil tussen het gewenste golfspectrum en het spectrum van het vooraf berekende (offline) signaal
- Verschil tussen het offline signaal en het voorbewerkte signaal (clamping) dat uitgestuurd wordt
- Verschillen tussen het uitgestuurde signaal en de gemeten schotbeweging (overigens te verwachten vanwege de ARC)
- Verschillen in lange golfgedrag en afslag door het toepassen van randvoorwaarden op dieper water.

Ten eerste is via literatuurstudie de gebruikte gebonden golftheorie in Auke bepaald en vergeleken met de theorie in XBeach.

Ten tweede zijn de digitale projectdata van project H4357 opgevraagd. Deze projectdata omvatte data met tijdseries van de stuursignalen, de totale schotbeweging en de gemeten waterbeweging en snelheden van elke proef. Van deze signalen zijn spectra gemaakt waarbij gefocust is op het laag-frekwente domein.

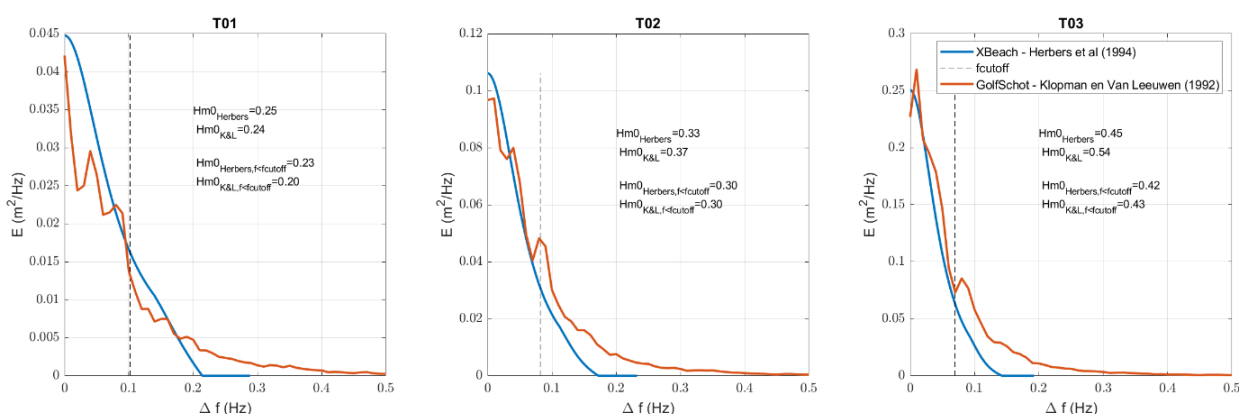
Ten derde zijn analyses gemaakt op basis van XBeach modellering om het gedrag van de lange golven voor diverse varianten van de toegepaste randvoorwaardelokatie te onderzoeken.

2.5 Resultaten

2.5.1 Vergelijking gebruikte theorie

Ten eerste is geverifieerd dat de in het golfschotsturingprogramma Auke/Generate geïmplementeerde gebonden golftheorie overeenkomt met de theorie in XBeach.

In XBeach is de theorie van Herbers et al. (1994) (wat een uitwerking is Hasselmann (1962)) gebruikt. Dit is een spectrale aanpak waarbij de interactie tussen golfcomponenten wordt berekend. Deze implementatie is eerder geverifieerd met de resultaten van Herbers et al (1994) en Klopman en Dingemans (2001). In Auke/generate is de aanpak van Klopman en Van Leeuwen (1992) geïmplementeerd. Deze methode rekent in het tijdsdomein en verschilt dus van de Herbers aanpak (die in het vorige hoofdstuk is beschreven). Echter, de resultaten zijn zeer overeenkomstig (Figuur 2.6) zeker in het frequentiebereik onder de halve piekfrekwentie, dat in de gootproeven is gebruikt als grens tussen de lange en korte golven. Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat de in Deltares/Arcadis (2018) geconstateerde verschillen niet voortkomen uit het toepassen van verschillende theorieën.

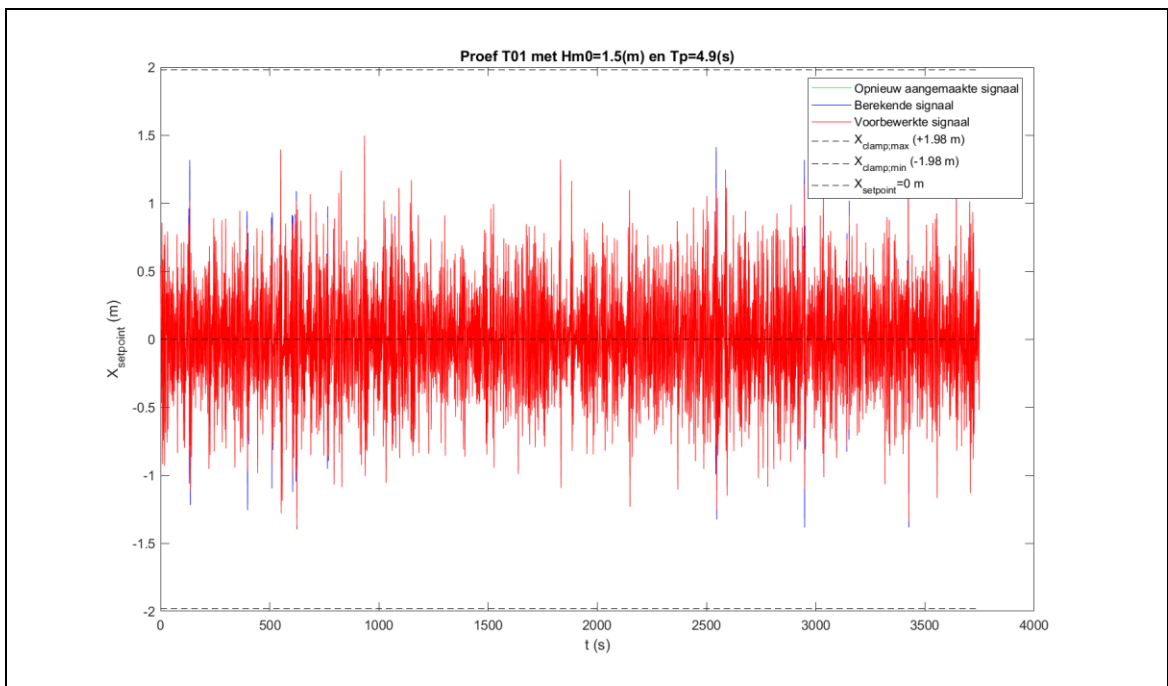


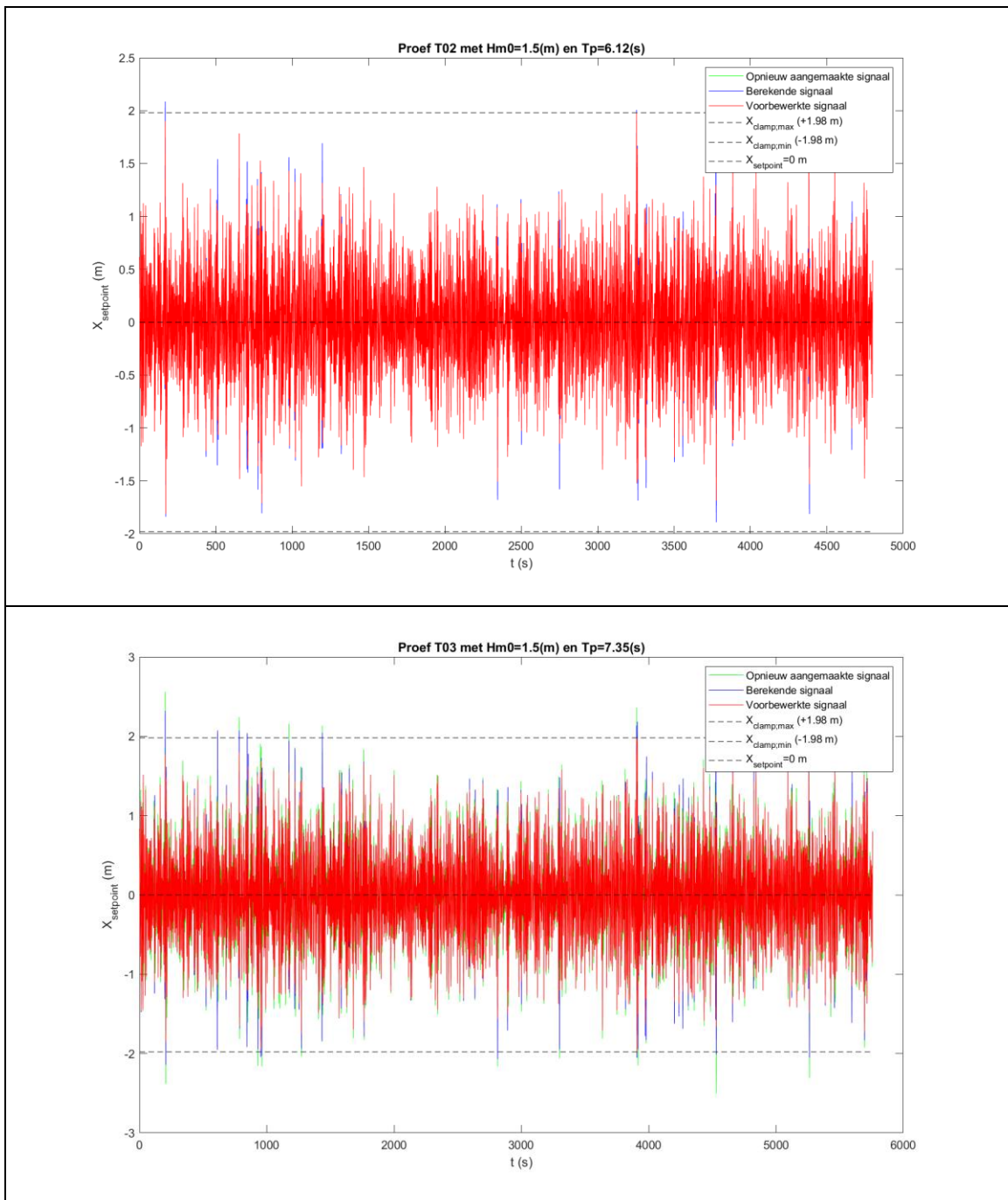
Figuur 2.6 Vergelijking lange golf energie voor twee verschillende theorieën: Herbers (blauw) zoals gebruikt in XBeach en Klopman van Leeuwen (rood) zoals gebruikt in Auke/generate. De totale gebonden golf energie en het laag-frekwente deel ($f < f_p/2$) is als tekst weergegeven in de drie panelen.

2.5.2 Vergelijking tussen het gewenste, vooraf berekende en voorbereekte stuursignaal

Als tweede stap zijn de stuursignalen opgevraagd uit de projectschijf H4357. De stuursignalen PMi001A, PMi002A en PMi003A die gebruikt zijn bij respectievelijk proef T01, T02 en T03 zijn geanalyseerd (Figuur 2.6).

Hier wordt een vergelijking gemaakt tussen het vooraf berekende signaal (aangemaakt tijdens het uitvoeren van de proeven) (blauwe lijn), het voorbereikte (door het hierboven beschreven clamping algoritme) signaal (rood) en een opnieuw aangemaakt signaal (groen). Voor proef T01 met de kortste periode laat dit zien dat het opnieuw aangemaakte signaal en vooraf berekende signaal aan elkaar gelijk zijn, met andere woorden het signaal is te reproduceren. Dit signaal wordt met het clamping programma verder voorbereikt, waardoor er kleine verschillen tussen de blauwe en rode lijnen optreden, met name rond de pieken in het signaal waar de versnellingen groot zijn. In de figuur zijn ook de maximale schotuitwijkingen aangegeven. Voor deze proef blijft het stuursignaal binnen de maximale waarden. Bij proef T02 geldt nagenoeg hetzelfde, maar hier zijn er schotposities die groter zijn dan het maximum en met het clamping programma verlaagd worden. Bij proef T03 treden er grotere verschillen op en zijn er al verschillen tussen het opnieuw aangemaakte signaal en het opgeslagen stuursignaal, zelfs voordat clamping (verschil tussen groen en blauw) is toegepast. Er zijn diverse tijdstippen waarop het schot wordt overvraagd en dus via clamping aangepast moet worden. Dit is vooraf te verwachten omdat de proef T03 zich op het randje van het werkgebied bevindt (Figuur 2.5). Waarom deze stuursignalen zo afwijken wordt hieronder verder onderzocht.



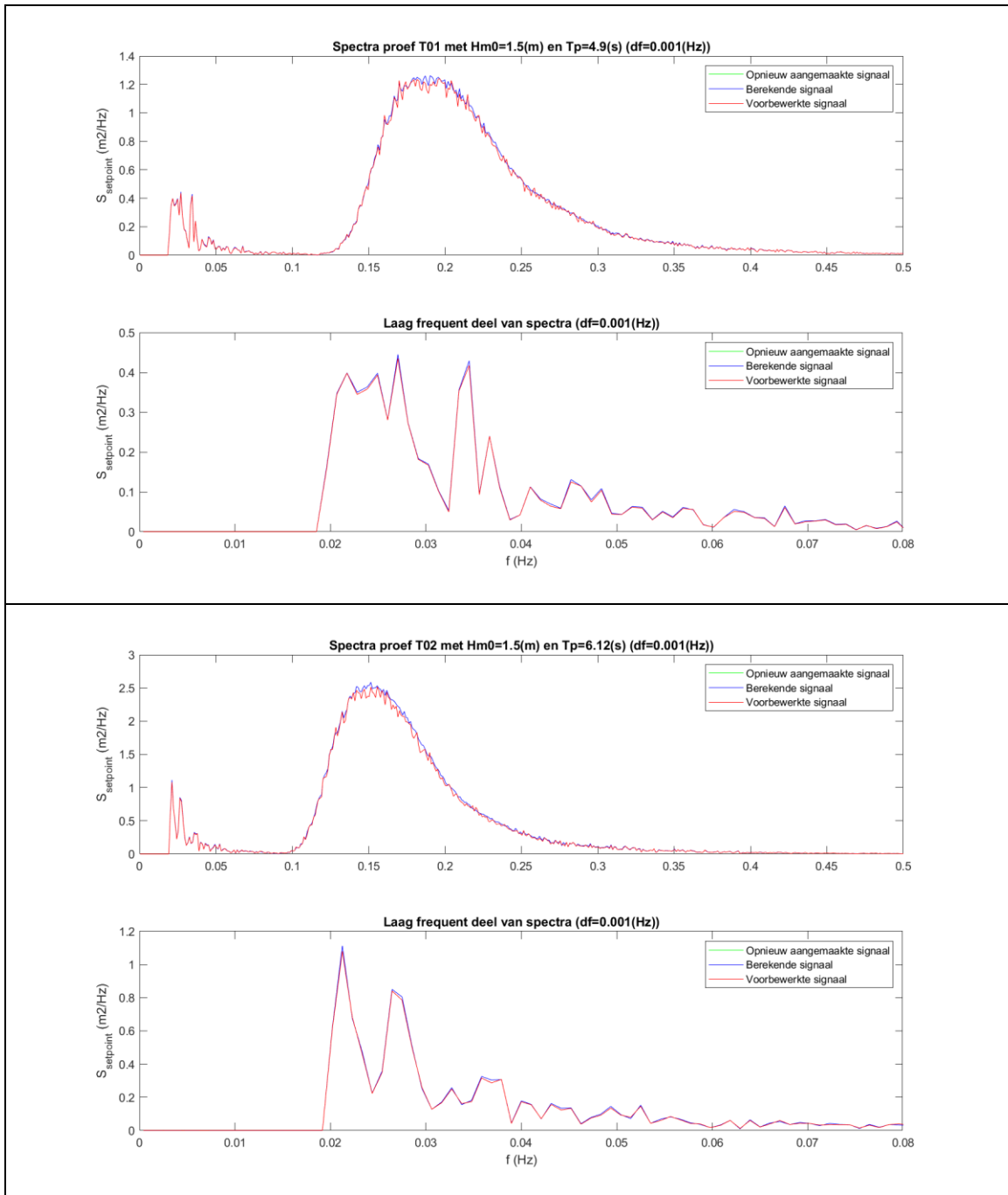


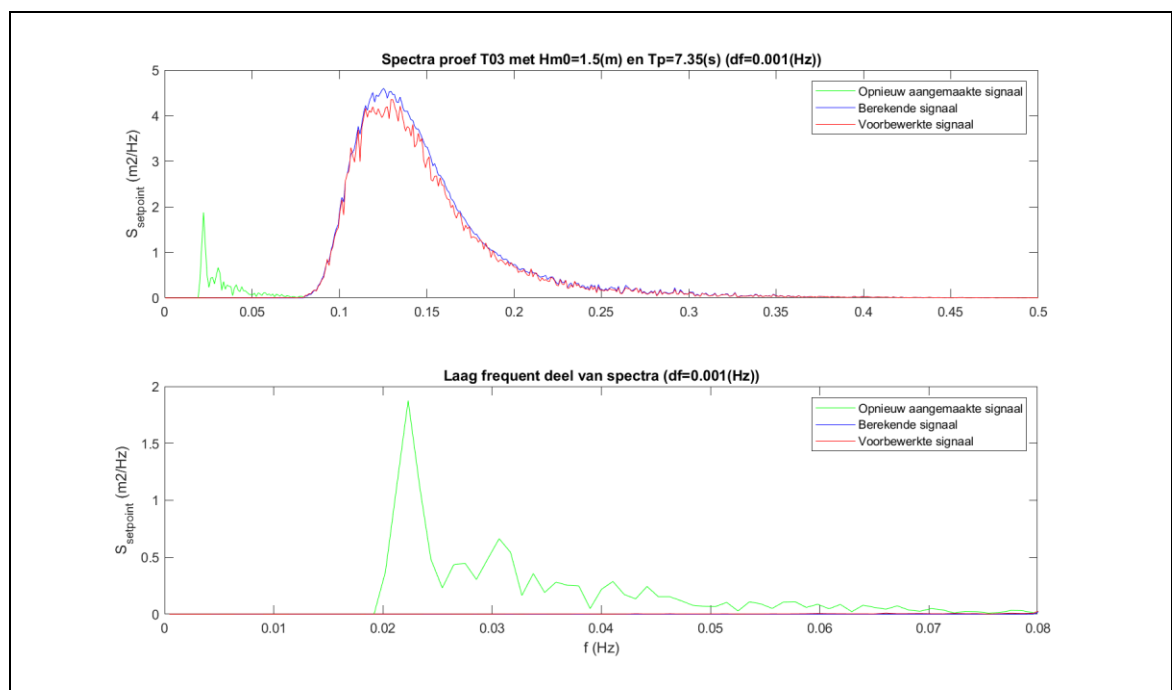
Figuur 2.7 Stuursignalen in meter schotbeweging voor de drie proeven T01, T02, T03. Geplot zijn het voor de proef berekende stuursignaal (blauw), het voorbewerkte signaal (met clamping, om het schot te beschermen) (rood) en het voor dit rapport opnieuw gegenereerde signaal (groen). Verder zijn de maximale en minimale schotpositie aangegeven.

Van de tijdsignalen zijn vervolgens frequentiespectra gemaakt, die gepresenteerd worden voor zowel voor het hele frequentiedomein (korte en lange golven) als voor het laagfrequente gedeelte (Figuur 2.8). Deze laten voor T01 en T02 zien dat de opnieuw gemaakte (groene lijnen) overeenkomen met de opgeslagen offline signalen (blauw). De clamping heeft een minimaal effect gehad (rode lijnen). Opgemerkt wordt dat er geen energie onder de 0.02 Hz is aangemaakt (d.w.z. gebonden lange golven langer dan 50 seconden op modelschaal en langer

11203720-013-GEO-0002, 10 juli 2019, definitief

dan ongeveer 122 seconden op prototype schaal). Dit is een hard-ingebouwde waarde in het stuurprogramma om het opwekken van zeer lange golven die een grote slag vergen te voorkomen. Bij proef T03 gebeurt iets anders, daar is geen gebonden golfenergie onder de 0.08 Hz opgewekt (d.w.z. gebonden lange golven langer dan 12.5 seconden op modelschaal en langer dan ongeveer 30 seconden op prototype schaal). Uit de tijdshistorie van het aanmaken van de stuursignalen is te achterhalen dat hier de lange golfcomponenten expliciet zijn weggefilterd. De reden hiervoor is dat proef T03 op de rand van het werkgebied zit en al het vermogen en slag nodig is om de korte golven op te wekken. Gebonden (tweede-orde) golven zou nog meer van het schot vragen. Waarschijnlijk is het volledige signaal wel geprobeerd in de testfase maar gaf dit mechanische problemen met het schot ("schot gaat bonken"), waarna besloten is om het schot te sparen.





Figuur 2.8 Variantiedichtheidspectra voor de drie proeven T01, T02, T03 voor het hele frequentie domein en ingezoomd op het laagfrequentie deel. Geplot zijn de spectra van het voor de proef berekende stuursignaal (blauw), het voorbewerkte signaal (met clamping, om het schot te beschermen) (rood) en het voor dit rapport opnieuw gegenereerde signaal (groen).

Deze ondergrens van de opgewekte frequenties heeft natuurlijk wel consequenties voor de opgewekte gebonden golf. Dit is te zien in Tabel 2.1, waar de gebonden golfhoogten voor de drie proeven en voor verschillende frequentiebanden gegeven zijn. Hieruit is te zien dat de cutoff-frequentie van 0,02 Hz (voor T01 en T02) en 0,08 Hz (voor T03) een behoorlijke reductie (tussen de 13 en 18% voor de eerste twee proeven) in de opgewekte lange golfhoogte veroorzaken ten opzichte van de Herbers theorie. Voor proef T03 is er helemaal geen gebonden lange golf uitgestuurd. Omdat de langegolfhoogte toeneemt met de periode wordt in absolute zin de reductie ook steeds groter.

Tabel 2.1 Gebonden golfhoogten(m) bepaald uit het met Auke berekende golfsignaal voor de drie proeven, en verschillende frequentiebanden. De reductiefactor is de verhouding tussen de golfhoogte tussen de cutoff frequentie en de halve piekfrequentie en de golfhoogte van de nulrequentie tot de halve piekfrequentie.

Frequentie bereik/Proef	T01	T02	T03
$0 < f < \infty$	0.244	0.374	0.542
$0 < f < f_p/2$	0.200	0.300	0.430
$f_{cutoff} < f < f_p/2$	0.173	0.246	0.0
Reductiefactor	0.135	0.180	1.0

De conclusie die uit dit deel van de analyse kan worden getrokken is dat vanwege settings in de stuursoftware een gedeelte van de gebonden lange golven zoals de theorie voorschrijft niet opgewekt is geweest. In geval van proef T03 is er helemaal geen lange golf uitgestuurd. Wat dit voor consequenties heeft gehad voor het lange golfbeeld en de gemeten lange golven in de goot wordt hieronder uitgewerkt.

2.5.3 Verschillen tussen het uitgestuurde signaal en de gemeten schotbeweging

De databestanden van project H4357 bevatten naast de stuursignalen ook de gemeten schotbeweging. Omdat Actieve Reflectie Compensatie (ARC) wordt toegepast zullen deze signalen per definitie niet aan elkaar gelijk zijn: de vooraf berekende stuursignalen drijven het schot aan, maar het schot reageert ook op gereflecteerde golven, zodat de totale schotbeweging het resultaat is van deze twee inputs. Toch is het leerzaam om de stuursignalen en de verplaatsing te vergelijken.

De volgende bewerking is uitgevoerd: met een correlatie analyse zijn de stuursignalen en de schotverplaatsingen gesynchroniseerd. Daarna is het stuursignaal van het verplaatsingssignaal afgetrokken om het reflectiesignaal over te houden. Van het stuursignaal en het reflectiesignaal zijn spectra gemaakt, die hieronder geplot zijn.

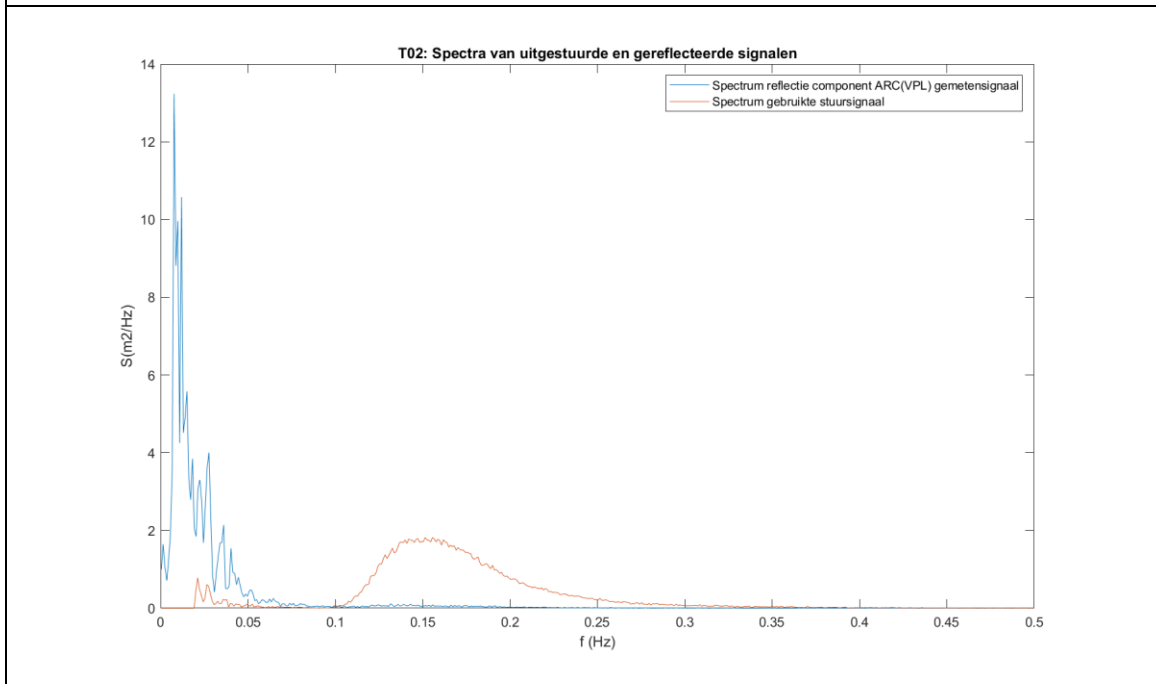
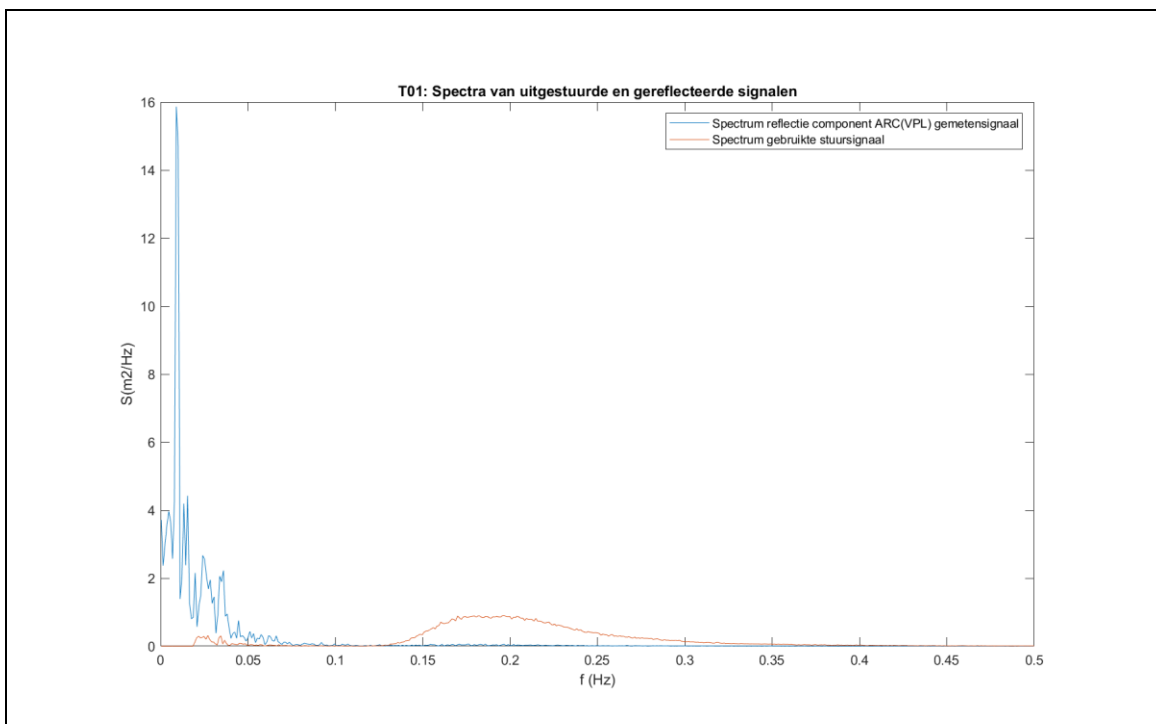
Wat direct opvalt, is dat de energie inhoud van het gereflecteerde deel groter is dan het uitgestuurde deel, en groter wordt van T01, T02 naar T03. Dit is deels te verklaren uit het feit dat er geen gebonden golfenergie wordt uitgestuurd onder een frequentie van 0.02 Hz (0.08 Hz in proef T03). Een ander deel kan verklaard worden uit het feit dat de lange golven energie overgedragen krijgen tijdens het proces van shoalen en breken van de korte golven en dus vanaf het schot in energie toenemen.

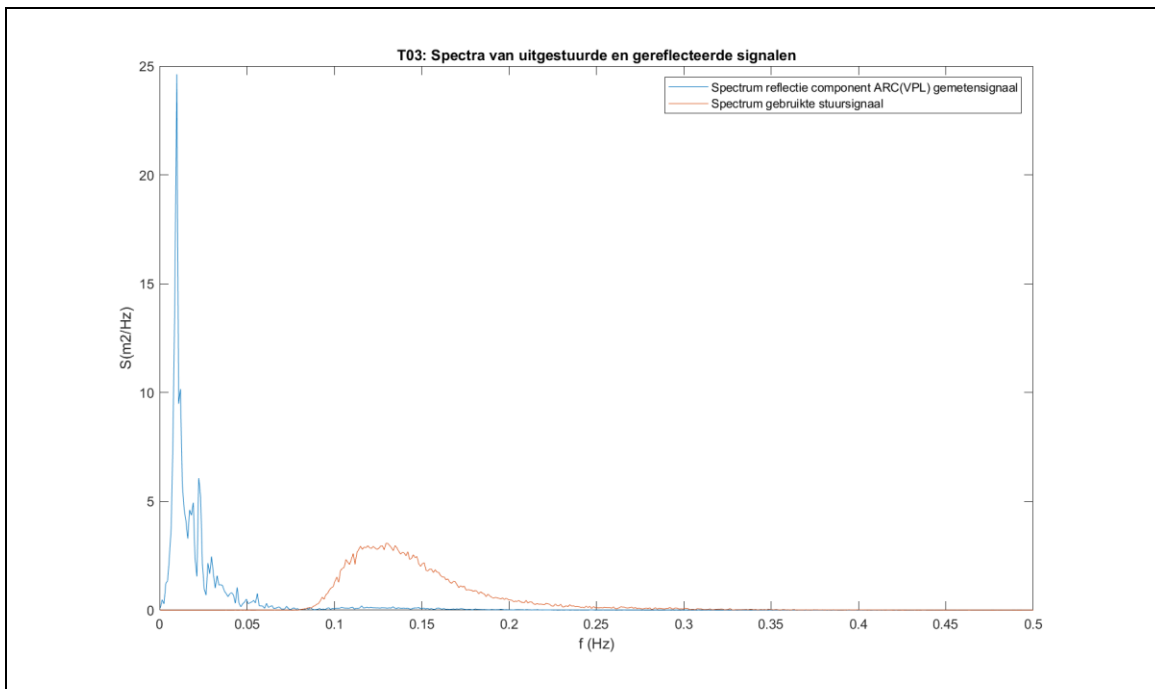
Verder valt een duidelijke piek rond de 0.01Hz op: dit is de eigen frequentie van de goot bij de gebruikte vooroever met duinprofiel, die door de schotbeweging onderdrukt wordt. De eigenfrequentie kan bepaald worden aan de hand van Dean and Dalrymple (1991, Tabel 5.1, pagina 149) waar voor een driehoekig profiel (wat de Deltagoot met een voorland ongeveer is) de eigenperiode gegeven wordt door

$$T = 1.64 \frac{2L}{\sqrt{gh}}$$

Voor een afstand van het golfschot tot aan het duin van 200 meter en een waterdiepte bij het schot van 4.5 meter levert dit een periode van $T = 98.7$ s oftewel nagenoeg de geobserveerde frequentie van 0.01 Hz.

De conclusie uit dit deel van de analyse is dat alhoewel de zeer laagfrequente golven (onder de 0.02 Hz, 0.08 Hz voor proef T03) niet expliciet uitgestuurd worden, ze wel in de goot voorkomen. Blijkbaar worden ze in het proces van de golftransformatie opgewekt.

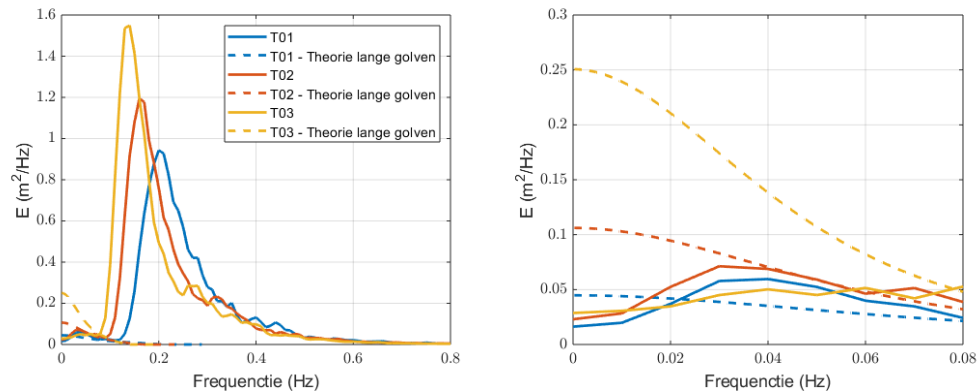




Figuur 2.9 Variantiespectra van het berekende stuursignaal (oranje) en de gemeten schotbeweging (blauw) voor de drie proeven T01, T02 en T03.

2.5.4 Gemeten spectra nabij het golfschot

De waterbeweging is dichtbij het schot (op zo'n 41 m vanaf het golfschot) gemeten met waterstandsmeters en een snelheidsmeter. Van de oppervlakteuitwijkingen, die gemeten zijn door de waterstandsmeters, zijn energiedichtheidsspectra gemaakt. Het korte golf gedeelte ($f > 0.1$ Hz) komt overeen met de doelspectra (Figuur 2.10, linkerfiguur). Met betrekking tot het laagfrequente gedeelte (rechterfiguur) is te zien dat voor proef T01 en T02 het gemeten spectrum redelijk overeenkomt met het spectrum gemaakt op basis van de gebonden lange golf theorie (vergelijk de getrokken en gestippelde lijnen), maar dat de energie afneemt onder de 0.02 Hz. Dit is het gevolg van de bovengenoemde setting in het stuurprogramma. Hierbij moet de opmerking worden gemaakt dat deze theorie geldt voor de inkomende golven terwijl de gemeten spectra van het totale signaal zijn. Het gemeten spectrum van proef T03 ligt duidelijk onder het theoretisch spectrum omdat er geen energie onder de 0.08 Hz is opgewekt.



Figuur 2.10 Gemeten golfspectra voor de drie proeven. Links: totale golfspectra en rechts het laagfrequente deel van de spectra. De getrokken lijnen zijn de metingen en de gestippelde lijnen de theorie.

In principe kunnen de inkomende en gereflecteerde golven op basis van een gemeten oppervlakteuitwijking en snelheid worden gescheiden, onder de aanname dat de inkomende golven met een bepaalde snelheid (bijvoorbeeld de groepssnelheid) lopen en de uitgaande golven ook met een bepaalde snelheid. In dit geval wordt niet aan deze aanname voldaan omdat de inkomende golven bestaan uit een combinatie vrije golven en gebonden golven, die elk met hun eigen snelheid lopen, zodat er op basis van twee gemeten signalen geen goede scheiding te maken is.

2.6 Analyse gebonden en vrije golven

Uit de bovenstaande data analyse blijkt, dat om verklaarbare redenen een deel (afhankelijk van de testconditie 13,5% tot 100%) van de gebonden golfenergie niet opgewekt is aan het golfschot. Dit missende deel hoort volgens de theorie bij het wel volledig opgewekte korte golfveld, zodat er een discrepantie ontstaat. Het watersysteem reageert hierop als volgt.

Bij de volledig opgewekte korte golven “hoort” een lange golf die met de golfgroepen meeloopt. Wiskundig gezien vormen de gebonden lange golven namelijk de particuliere oplossing van het lange golfsysteem waarbij de korte golven de forcering zijn (Mei and Benmoussa, 1984). Een fysische interpretatie is dat de gemiddelde waterstand iets naar beneden wordt gedrukt door de hoge golven in de groep en dat de gemiddelde waterstand iets omhoog komt ter plekke van de lage golven. Deze variatie van de waterstand is zelf een golf die meeloopt met de golfgroepen en wordt de de gebonden golf genoemd.

Het probleem is dat er een discrepantie is tussen de waterbeweging (waar de gebonden golven van nature in zitten) en de schotweging (waar een deel van de gebonden golven niet in zit). De schotbeweging sluit dus niet aan bij wat het golfsysteem verwacht. De schotbeweging zou gelijk moeten zijn aan de deeltjessnelheid U onder de gebonden golven

$$U_g = c_g \frac{\eta_g}{h}$$

waar “g” voor gebonden staat. Maar als er geen lange golven worden opgewekt aan het schot is de schotbeweging voor de lange golven nul en de deeltjessnelheid ter plaatse van het schot ook.

Daarvoor compenseert het systeem door zogenaamde “vrije” of “stoor”golven met dezelfde golfperiode als de gebonden golven aan te maken (Sand, 1982) die aan het schot de tegengestelde deeltjessnelheid hebben (dus in tegenfase zijn) ten opzichte van de gebonden golven, zodat $U_g + U_f = 0$, waarbij f voor “vrij” staat. Deze stoorgolven planten zich vanaf het schot voort met hun eigen loopsnelheid (van de lineaire golftheorie).

Er zijn dus twee typen lange golven ontstaan die van vanaf het schot naar het strand lopen: de gebonden en vrije (of stoor) lange golven, die dezelfde frequentie hebben maar vanwege een verschillende loopsnelheid een verschillende golflengte. De gebonden lange golven “horen” bij de korte golfgroepen en de vrije lange golven “horen” bij de incorrecte golfopwekking. Als de schotbeweging correct zou zijn, dan worden de vrije lange golven niet opgewekt.

Zowel de gebonden als vrije golven lopen naar het strand, waar ze beiden de processen van golfbreken en duinafslag beïnvloeden. In welke mate dat het geval is, is nog onbekend. Beide golven reflecteren deels vanaf het strand waarna ze beiden als vrije golven weer teruglopen naar het schot. Het golfschotsturing algoritme is zo ingericht dat deze gereflecteerde vrije golven door de Actieve Reflectie Compensatie gedempt worden.

De snelheidsamplitudes van de gebonden en vrije golven zijn ter plaatse van het schot gelijk zodat de netto snelheid nul is. De amplitudes van de oppervlakteuitwijking zijn niet aan elkaar gelijk, omdat de vrije golven met de lineaire snelheid c lopen

$$U_f = c \frac{\eta_f}{h}$$

waar “ f ” voor “free” staat. Als we de snelheidsamplitude gelijk stellen is de verhouding tussen de amplitudes van de oppervlakteuitwijkingen gelijk aan c_g/c .

Deze gebonden en vrije golven zijn aan het schot in exacte tegenfase maar omdat ze met verschillende snelheden lopen, verandert in de richting van het strand hun onderlinge fase, en halen de vrije lange golven de gebonden lange golven (langzaam) in. Deze “inhaalengte” is een functie van het onderlinge snelheidsverschil en de golflengte. Waar de gebonden en vrije golven aan het schot uit fase zijn (en elkaar uitdoven) zullen ze elkaar op een bepaalde afstand van het golfschot juist versterken. Echter, bij de lage frequenties zijn de golflengten zo groot dat dit niet binnen de afstand van het schot naar het strand gebeurt.

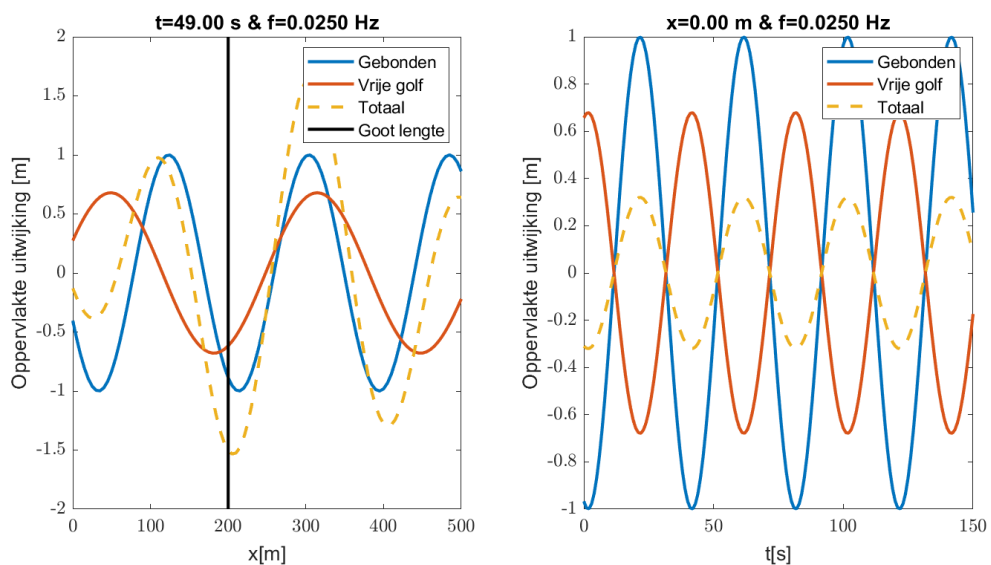
Dit wordt geïllustreerd aan de hand van de volgende principebeschouwing van een golfveld bestaande uit een gebonden en een vrije lange golfcomponent met dezelfde frequentie in een oneindig lange goot met een vlakke bodem. Hierbij wordt aangenomen dat de vrije golf met de ondiep-water golfsnelheid loopt ($c_{ondiep} = \sqrt{gh}$) en dat de gebonden golf met de groepssnelheid loopt die bepaald is op basis van de piekperiode van het spectrum. De oppervlakteuitwijking van de twee componenten is dan,

$$\eta_{gebonden} = A \cos \omega t - k_{cg} x$$

$$\eta_{stoorgolf} = -A \frac{c_g}{c_{ondiep}} \cos \omega t - k_{ondiep} x$$

Waar A de amplitude van de gebonden golf is, ω de hoekfrequentie, k_{cg} het golf getal gegeven de groep snelheid, k_{ondiep} het golf getal gegeven ondiep water, c_g de groep-snelheid, c_{ondiep} de ondiep-water golfsnelheid en η de oppervlakte uitwijking is. Aan het schot start de vrije golf met een dal en heeft de volgende golftop een achterstand van een halve golflengte.

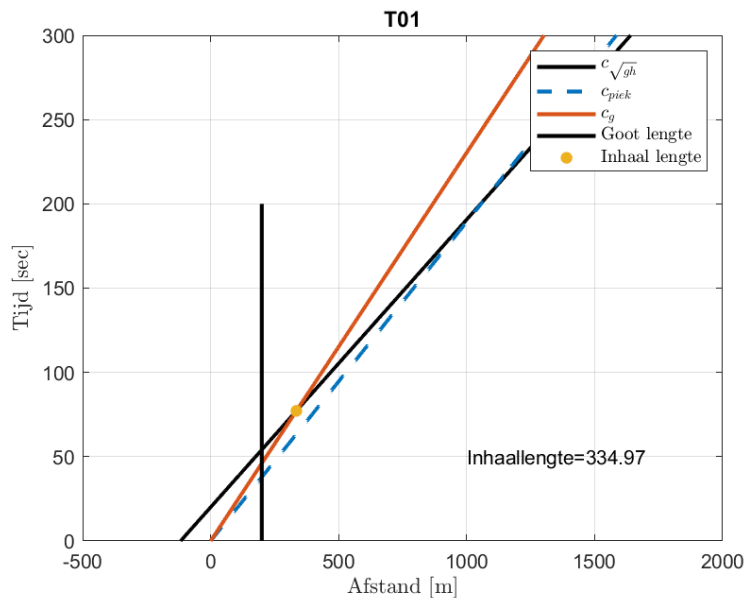
De ontwikkeling van de som van de componenten in de ruimte en tijd is geïllustreerd in Figuur 2.11 voor test T01 en een frequentie van 0.025 Hz en een (willekeurige) amplitude van de gebonden golf van 1 m. De amplitude van de bijbehorende vrije golf is uitgerekend op basis van een vergelijkbare diepte-gemiddelde snelheid aan het golf schot ($\eta_{gebonden} c_g = \eta_{stoorgolf} c_{ondiep}$). De tijdserie op de locatie van het golfschot (rechter paneel in Figuur 2.11) laat zien dat de vrije golf uit fase is met de gebonden golf en dat de totale golfhoogte veel kleiner is dan elk van de componenten. Het verschil in loopsnelheid is duidelijk zichtbaar in het linker paneel van Figuur 2.11. In het begin van de goot zijn beide golven uit fase en naarmate de afstand toeneemt zullen de twee golven elkaar in gaan halen, wat zorgt voor een amplitude oscillatie van het totale signaal.



Figuur 2.11 Gebonden en vrije golf in het ruimtelijke en tijds domein. Het linker paneel geeft de gebonden, stoorgolf en totale signaal weer in de ruimte. Het rechter paneel geeft de gebonden, stoorgolf en het totale signaal weer in het tijdsdomein ter plaatse van het golfschot.

Doordat de vrije golf op het golfschot ($x=0$) uit fase is met de gebonden golf, maar zich sneller voortplant dan de gebonden golf, zullen de toppen van beide golven elkaar op een bepaalde locatie versterken. Deze inhaallengte is weergegeven in Figuur 2.12, waar de top van een golf in een plaats-tijd diagram is weergegeven. De gebonden golf is weergegeven met de rode lijn en loopt met de groepssnelheid. De vrije golf is weergegeven met een zwarte lijn. Deze heeft een kleinere helling wat betekent dat deze sneller loopt. De top van deze vrije golf start een halve golflengte achter het golfschot ($x=-L$). De inhaallengte, het moment waarop de twee toppen elkaar versterken, is weergegeven met de oranje stip. Doordat de snelheid van de

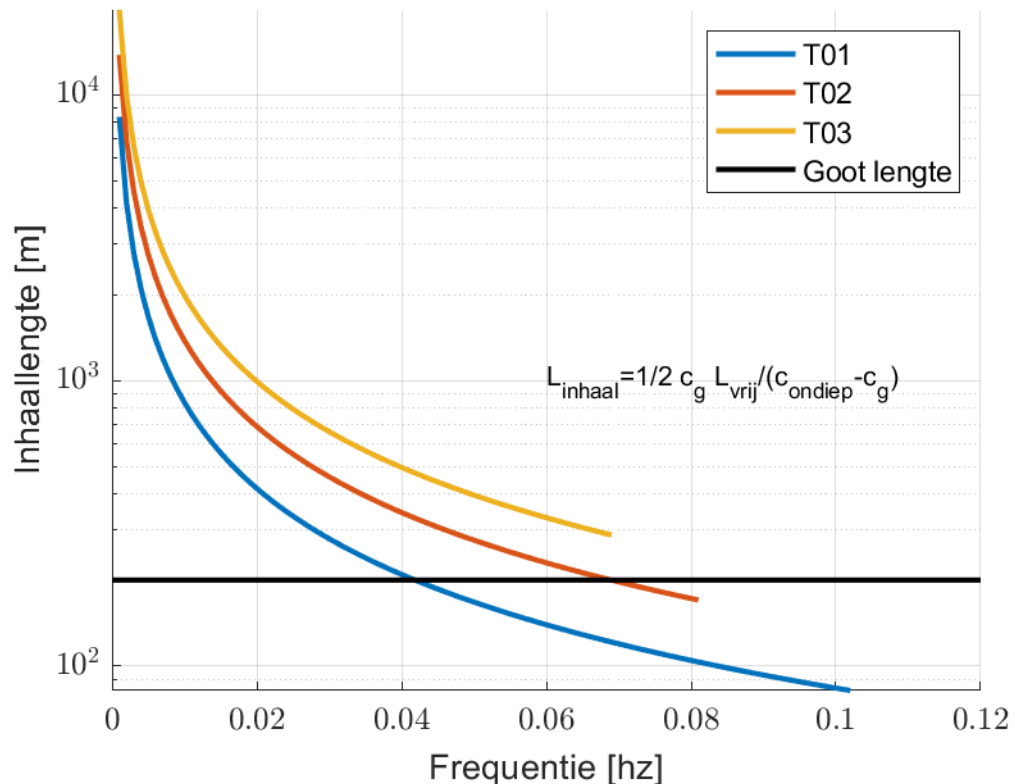
gebonden niet veel langzamer is dan de stoorgolf is een relatief lange afstand nodig voordat de toppen samen vallen en is in dit geval de inhaallengte groter dan de gootlengte.



Figuur 2.12 Afstand-tijd diagram voor de gebonden golf (c_g) en vrije golf ($c\sqrt{gh}$) voor een frequentie van 0.025 Hz.

Ter illustratie is ook de piek van het spectrum in het figuur weergegeven (c_{piek}).

De inhaallengte zal per frequentie verschillen, omdat de golflengte een functie is van de frequentie. Om dit effect te illustreren is per frequentie de inhaallengte bepaald voor de drie testen (Figuur 2.13). De inhaallengte neemt toe met kleiner wordende frequentie omdat de halve golflengte "achterstand" van de vrije golf toeneemt. Daarnaast is ook het effect van de piek periode per proef duidelijk zichtbaar. De groepssnelheid waarmee de gebonden golf loopt is een functie van de piekperiode. Bij toenemende piekperiode neemt de groepssnelheid toe en het verschil met de ondiepwatersnelheid af. Dit vergroot de inhaallengte. De inhaallengtes zijn vaak langer dan de gootlengte van 200 meter ($2 \cdot 10^2$ m in de figuur, let op de logaritmische schaal), zeker voor proef T03.



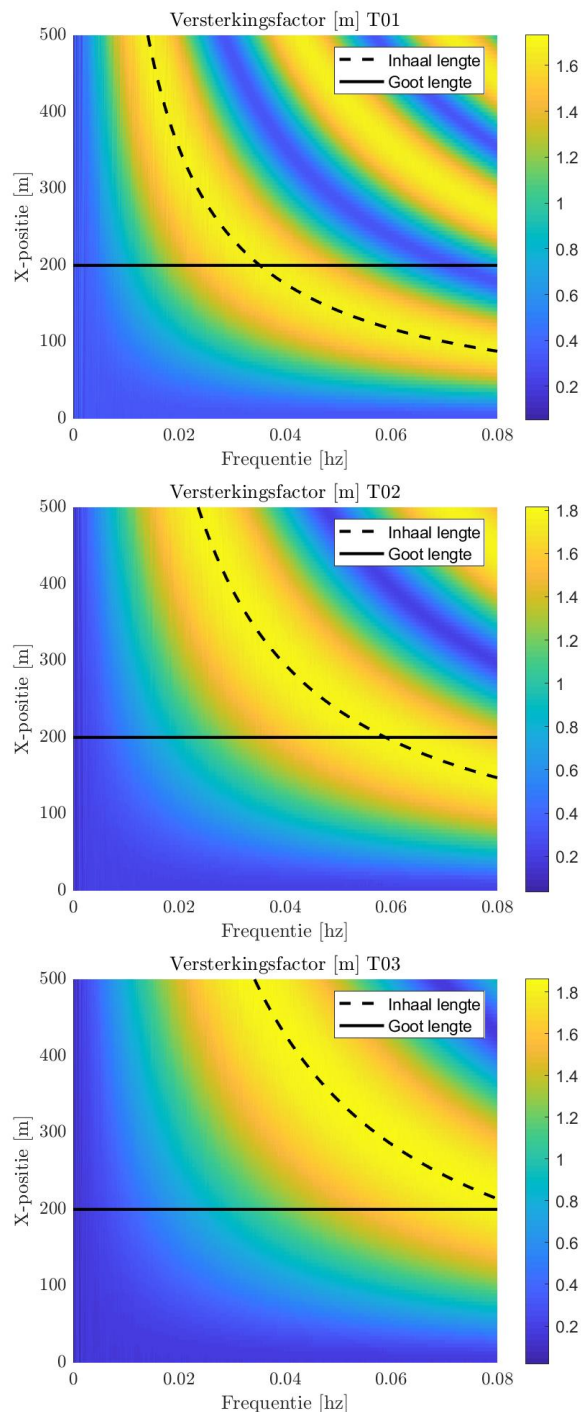
Figuur 2.13 Inhaallengte van de stoorgolf van de gebonden golf per frequentie getoond.

Niet alleen de inhaallengte kan worden bepaald, maar ook de versterkingsfactor als functie van de locatie en frequentie (Figuur 2.14). De versterkingsfactor is gedefinieerd als de amplitude van de som van beide componenten gedeeld door de amplitude van de gebonden golf. Ter plaatse van het golfschot zijn beide componenten uit fase, zijn de snelheidsamplituden gelijk aan elkaar en is de som van de oppervlakteuitwijkingen klein (maar niet gelijk aan nul, zie hierboven). Verder in het domein zal deze versterkingsfactor toenemen naar mate de stoorgolf de gebonden golf inhaalt.

Deze versterkingsfactor verklaart het effect van het niet uitsturen van (een deel van) de laagfrequente gebonden golven. Vanwege de grote inhaallengten zullen in geval van proef T03 de gebonden lange golven en lange stoorgolven nagenoeg uit fase blijven over de gehele gootlengte, zeker voor het laagfrequente deel van het spectrum. Hierdoor is de som van de beide componenten (de versterkingsfactor) klein en is de totale lange golf niet zichtbaar. Dit geldt dus alleen voor het niet uitgestuurde gedeelte van de lange golven.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor deze beschouwing een horizontale diepte is aangenomen terwijl in werkelijkheid een zandig profiel in de goot was aangebracht waardoor golven een andere snelheid krijgen. Hoe ondieper, hoe dichter de groepssnelheid de vrije golfsnelheid benadert, en dus hoe groter de inhaallengte wordt. Daarnaast zullen de golven er ook een amplitudeverandering (door shoaling en energieoverdracht) ondergaan. Dit proces is complex waarvoor hieronder het XBeach model wordt ingezet voor de analyse.

De conclusie van deze analyse is dat voor de lange golven de schotbeweging niet goed aansluit bij wat de waterbeweging verwacht. Hierdoor ontstaan aan het schot vrije stoorgolven met dezelfde frequentie als de missende gebonden golven, die discrepantie tussen de waterbeweging en schotbeweging compenseren. Deze vrije stoorgolven planten zich door de golfgoot heen en verstoren het golfbeeld. Deze stoorgolven lopen met name voor de proeven met grotere perioden nagenoeg uit fase met de gebonden golven over de hele gootlengte, zodat de totale lange golf kleiner is dan theoretisch verwacht.

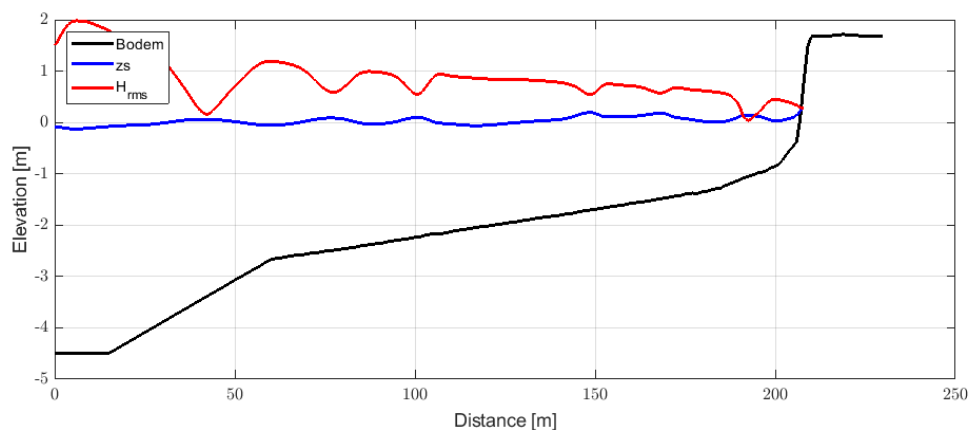


Figuur 2.14 Versterkingsfactor voor de drie proeven T01, T02 en T03 berekend per x-positie en frequentie.

2.7 Effect van diepte offshore rand op lange golftransformatie en duinslag

In deze paragraaf wordt met XBeach voor het profiel in de Deltagoot onderzocht wat het gedrag van de lange golven is voor verschillende keuzes van de diepte van de rand, en wat de resulterende duinafslag is. Deze resultaten zijn input voor de consequentieanalyse in Hoofdstuk 3.

Het XBeach model is geschematiseerd als in Deltares/Arcadis (2018). Het domein is gediscretiseerd met een roostergrootte van een 0,5 m (Figuur 2.15). Voor de testen gebaseerd op de gemeten signalen is er begonnen op de locatie van de waterstandsmeters ($x=41$ m). De testen die op diep water beginnen hebben een voorland met een helling van 0,08. De uitvoerpunten zijn gedefinieerd met een ruimtelijk resolutie van 1 m in het gehele domein. De totale tijdsduur van de som is 6 uur exclusief 100 seconden inspeeltijd. De instellingen zoals beschreven in Van Thiel de Vries (2009) t.b.v. van consistentie met de lange golfanalyse in Deltares/Arcadis (2018). Op de rand is een absorberende-genererende randvoorwaarden gebruikt om de reflecterende golven te absorberen, net als in de fysieke experimenten.



Figuur 2.15 Model domein voor test T01. Als illustratie zijn de instantane korte en lange golven ook weergegeven. De locatie van de offshore rand verschilt per test

De volgende varianten van de randvoorwaarden zijn opgelegd in XBeach (allen zonder richtings spreiding):

- 1 Gemeten golfsignaal: Randvoorwaarden op basis van de metingen in de goot zoals gedaan in Van Thiel de Vries (2009);
- 2 PM spectrum (2^{de} orde): Randvoorwaarden op basis van een Pierson-Moskowitz spectrum met gebonden lange golven (tweede orde sturing), zoals uitgevoerd in Deltares/Arcadis (2018);
- 3 PM spectrum diepwater (2^{de} orde): Als 2) maar met randvoorwaarde in dieper water (14.5 m).

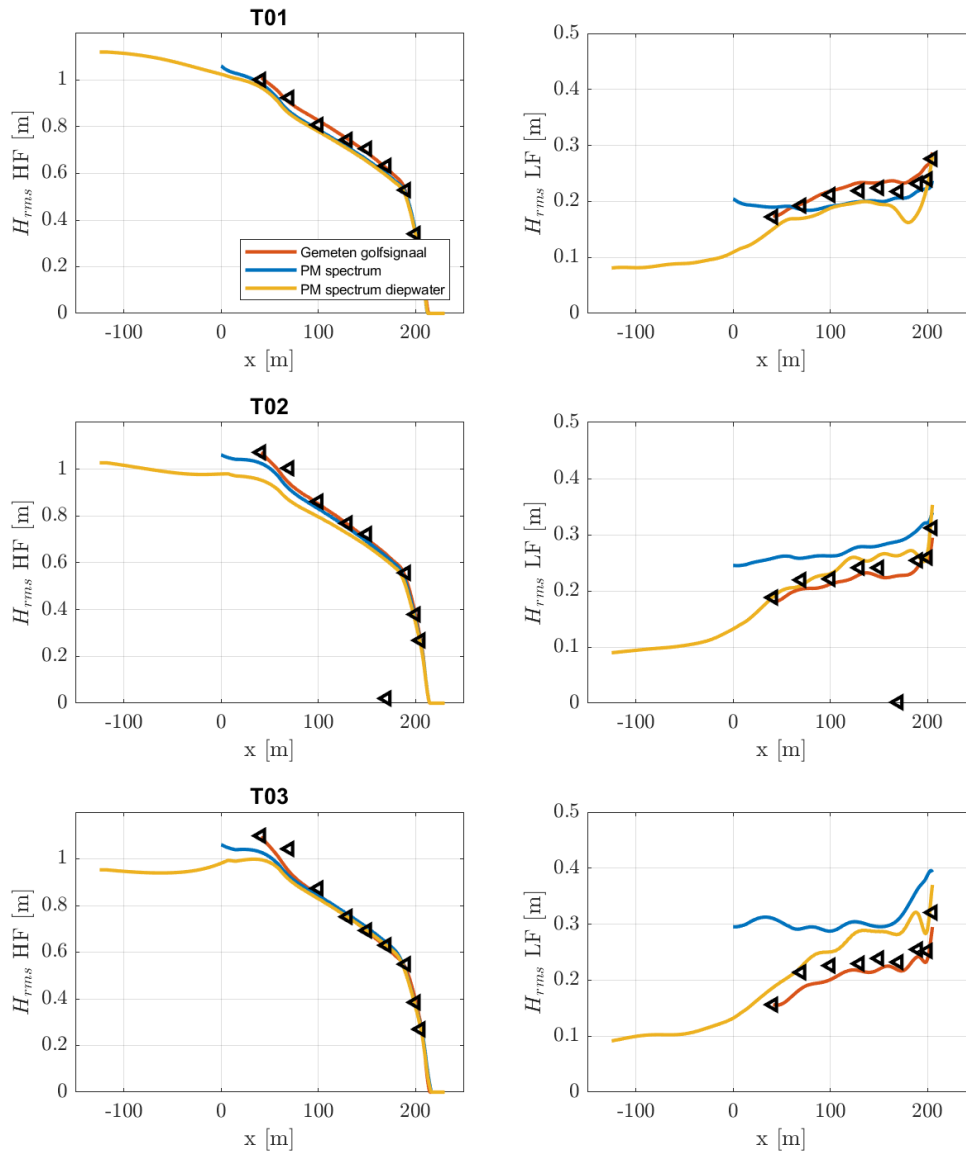
De golfhoogte van de lange golven is berekend aan de hand van de tijdreeksen voor verschillende uitvoerpunten. Voor elk van de tijdreeksen is de spectrale golfhoogte bepaald voor een low-passed (gefilterd) tijdsignaal, waarbij een grenswaarde van de helft van de piek frequentie ($f_p/2$) is gebruikt. De transformatie van de korte golven (Figuur 2.16, linker panelen) heeft voor alle varianten ongeveer hetzelfde patroon, alhoewel er een afwijking is voor de meetlocaties op dieper water voor de proeven T02 en T03 als de randvoorwaarden op diep

water worden opgelegd. Het lange golfgedrag (Figuur 2.16, rechter panelen) geeft een meer gevarieerd beeld. Voor alle drie de proeven benadert variant 1 de meetresultaten het beste (zie ook Deltares/Arcadis, 2018, Figuur 2.29). Als de tweede-orde randvoorwaarden op 4.5 meter worden opgelegd (variant 2), dan neemt de lange golfhoogte sterk toe van T01 naar T03 in de XBeach modellering. Voor proef T01 liggende de berekende golfhoogten dicht bij de metingen maar in proef T03 zijn de berekende golfhoogten veel groter (zie ook Deltares/Arcadis, 2018, Figuur 2.29). Blijkbaar worden de lange golfhoogten gedomineerd door de opgelegde randvoorwaarde.

Bij variant 3 waar de randvoorwaarden op dieper water zijn opgelegd, is de ontwikkeling van de lange golf in XBeach gematigder dan in variant 2, maar zijn de berekende waarden voor T02 en T03 nog steeds groter dan de gemeten waarden.

Het verschil in gedrag met variant 2 kan verklaard worden uit het feit dat als de randvoorwaarden op 4.5 meter worden opgelegd, de aanname wordt gedaan dat op die diepte de lange golven in evenwicht zijn met de korte golven, wat impliceert dat de waterdiepte zeewaarts van de modelrand constant wordt verondersteld. Met name voor de proef met een lange piekperiode T03 betekent dit dat de waterdiepte relatief ondiep was en met name de kortegolfhoogte/waterdiepte verhouding erg groot. Als de randvoorwaarden in XBeach op dieper water worden opgelegd, kunnen de lange golven zich in het domein ontwikkelen en is de invloed van de randvoorwaarden kleiner. Van al deze varianten is variant 3, waarbij gebonden golven op dieper water worden opgelegd theoretisch en vanuit modeleerperspectief de beste optie.

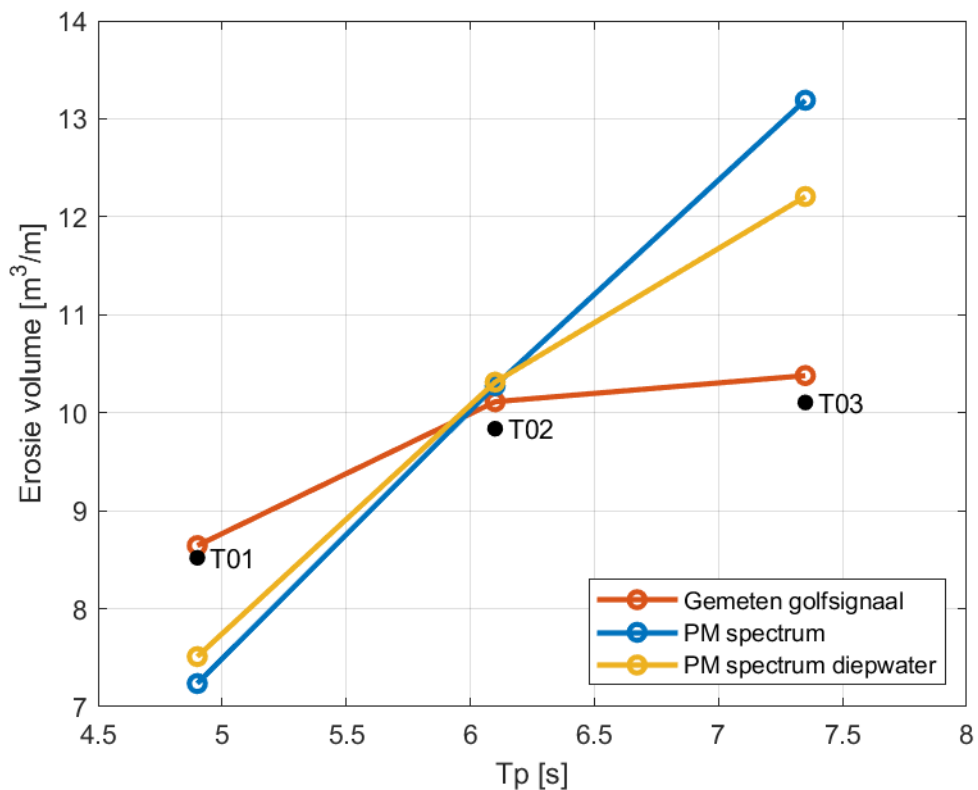
Op basis van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de keuze van de diepte waarop de randvoorwaarden in XBeach worden opgelegd een groot effect heeft op de langegolftransformatie. Naar verwachting geldt hetzelfde voor laboratoriummetingen. De keuze van de diepwaterrand is dus afhankelijk van de opgelegde golfperiode en golfhoogte. De diepte moet zo worden gekozen dat de korte golven in "intermediate depth" lopen (verhouding groepssnelheid en loopsnelheid van 0,7 of lager).



Figuur 2.16 Xbeach resultaten voor de verschillende proeven T01, T02 en T03 (van boven naar onder). Het linker paneel laat de kort golf energie zien en het rechter paneel de lange golven voor de drie varianten van aansturing: met het gemeten golfsignaal (rood), met het PM spectrum op 4.5 meter (blauw) en met het PM spectrum op dieper water (14.5 m) (geel).

Het effect op de afslag is getoond in Figuur 2.17. Alle varianten laten een toename zien in afslag als de piekperiode toeneemt, maar de mate van toename verschilt wel. Voor de metingen en variant 1 is de toename het kleinst, terwijl voor variant 2 waarin de randvoorwaarden op 4.5 meter werden opgelegd de toename het grootst is. Zoals hierboven besproken is deze waterdiepte relatief klein voor de proef T03 en zou de rand dieper moeten worden gekozen wat een gematigder lange golf ontwikkeling betekent. Dit geeft ook een verschil in de afslagtrend. Deze is in dit geval gematigder en houdt ongeveer het midden tussen

de meting en de trend berekend met XBeach als de randvoorwaarden “ondiep” worden opgelegd.



Figuur 2.17 Afslag volume voor de drie testen en de verschillende varianten.

3 Consequentieanalyse toename afslag

3.1 Inleiding en achtergronden

In het rekenmodel voor de beoordeling van de veiligheid van duinwaterkeringen wordt sinds 2007 rekening gehouden met het effect van de (langere) golfperiode op de mate van duinafslag. De oorspronkelijke kernformulering van dit model (het DUROS-model conform (Vellinga, 1986)) is toen gewijzigd in het zogenaamde DUROS+-model waarin het effect van de golfperiode via een aangepaste helling van het afslagprofiel in rekening is gebracht. Deze laatste formulering is vervolgens ondergebracht in het zogenaamde TRDA2006-model dat momenteel voor de daadwerkelijke beoordeling van zandige waterkeringen moet worden gebruikt (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid/ENW, 2007).

Afhankelijkheid golfperiode

De noodzaak tot het in rekening brengen van dit periode-effect kwam in 2002 in beeld door het nader analyseren van de op de Noordzeestations waargenomen golfcondities. Deze bleken de destijds gehanteerde ontwerpwaarden reeds te overtreffen. Zo werden er al golfperiodes gemeten die ver uit gingen boven de toen nog voor de piekperiode (T_p) gehanteerde bovengrens van 12 s.

Uit een verkennende studie kwam naar voren dat een langere golfperiode ook zou leiden tot een toename van de onder toetsomstandigheden te verwachten duinafslaghoeveelheden (Alkyon, 2002). Naast een eerste kwantificering van deze afhankelijkheid aan de hand van onder andere experimenten in een kleinschalige modelfaciliteit en DUROSTA-berekeningen (conform (Steetzel, H.J., 1993)) alsmede een analyse van de effecten op de veiligheid werd het effect van met name de langere golfperiode in een grootschalige modelfaciliteit onderzocht.

Basis voor implementatie

De vigerende formulering is als vervolg hierop gebaseerd op de resultaten van een aantal in 2006 in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium in de Voorst uitgevoerde gootproeven (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b). In een parallel uitgevoerde bureaustudie is een aangepaste formulering van het deterministische rekenmodel afgeleid welke vervolgens is verwerkt in een semi-probabilistisch model dat de basis vormt van het vigerende TRDA2006-model (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2007).

Laatste inzichten

De resultaten van de in 2018 uitgevoerde 'Aanloopstudie XBeach WBI' brachten aan het licht dat er in de uitgevoerde gootproeven minder gebonden lange golf energie aanwezig was in de goot dan op basis van XBeach-berekeningen en golftheorie werd verwacht. In het geval er minder gebonden lange golf energie aanwezig is in de gootproeven dan in de praktijk aanwezig is, dan kan dat leiden tot een onderschatting van de hoeveelheid duinafslag. Deze constatering is in het vorige hoofdstuk nader onderzocht.

Verwachte consequenties

Een mogelijke consequentie van bovenstaande is dat als er minder gebonden-lange golf energie in de proeven aanwezig was dan in de praktijk wordt verwacht, de eerder afgeleide DUROS+-formulering mogelijk een onderschatting geeft van de te verwachten duinafslag.

Aanpak en uitwerking

In dit hoofdstuk van de rapportage zijn de consequenties van een eventuele onderschatting van de hoeveelheid duinafslag op de formulering van zowel het deterministische DUROS+-

model als het op probabilistische basis gestoelde TRDA2006-model in beeld gebracht. Daartoe is de onderbouwing van de vigerende formulering opnieuw beschouwd en is het eventuele effect van de laatste inzichten 'vertaald' naar zowel aangepaste werkversies van het DUROS+ als het TRDA2006-model. Vervolgens zijn met deze aangepaste modellen berekeningen gemaakt voor een reeks van als karakteristiek te beschouwen Nederlandse situaties. De verschillen tussen de resultaten van het vigerende en het aangepaste model geven een beeld van de eventuele implicatie van het eerder beschreven inzicht op de veiligheid van de duinwaterkeringen.

Op basis hiervan kan een besluit worden genomen over de wijze waarop hiermee moet worden omgegaan.

In lijn met deze aanpak komen in dit hoofdstuk achtereenvolgens aan de orde:

- De wijze waarop het effect van de periode in rekening is gebracht;
- Het effect van de golfperiode op de afslaghoeveelheden;
- De kwantificering van de zogenaamde α -waarde;
- De definitie van aangepaste rekenmodellen;
- De resultaten van een serie afslagberekeningen;
- De kwantificering van het effect van de modelaanpassing;
- De mogelijke vervolgstappen.

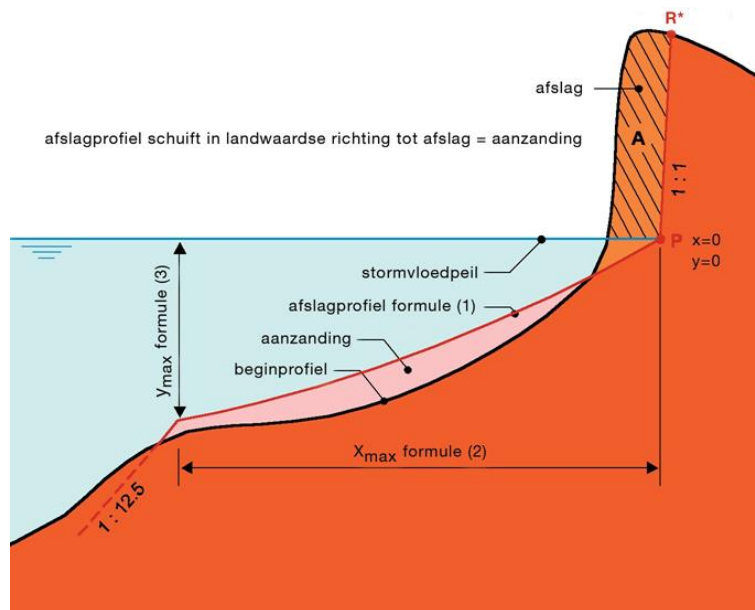
3.2 Implementatie periode-effect in het kernmodel

3.2.1 Inleiding

Om aansluiting te blijven houden met de vigerende procedures is zoveel mogelijk aangesloten op de wijze waarop het effect van de golfperiode thans in het kernmodel is verwerkt. Zoals al in de inleiding aangegeven is het effect op de mate van duinafslag ondergebracht in de formulering die de vorm van het afslagprofiel beschrijft. Deze aanpak zal nu ook worden gevolgd. In het volgende zijn respectievelijk de oorspronkelijke (1984) als de thans vigerende formulering toegelicht.

3.2.2 Oorspronkelijke formulering (1984)

In de oorspronkelijke vorm van het DUROS-model waren voor deze formulering de volgende overwegingen van toepassing (zie ook Figuur 3.1) (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/TAW, 1984).



Figuur 3.1 Basisformulering afslagprofiel (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid/ENW, 2007).

De duinvoet, het punt waar het steile front van het afgeslagen duin overgaat in het veel flauwere profiel van het strand, ligt ná afslag op het stormvloedpeil. De helling van het afgeslagen duintalud is gelijk aan 1:1.

Vanaf de duinvoet (punt P op $x = 0$; $y = 0$) verloopt het afslagprofiel parabolisch (loodrecht op de kust) in zeewaartse richting volgens de volgende formule:

$$\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right) y = 0,4714 \left[\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)^{1,28} \left(\frac{w}{0,0268}\right)^{0,56} x + 18 \right]^{0,5} - 2,0 \quad (3.1)$$

Deze parabool loopt door tot aan het punt waarvoor geldt:

$$x_{\max} = 250 \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right)^{1,28} \left(\frac{0,0268}{w}\right)^{0,56} \quad (3.2)$$

De hier aanwezige diepte beneden het stormvloedpeil is gelijk aan:

$$y_{\max} = 5,717 \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right) = 0,75 H_{0s} \quad (3.3a)$$

Of oorspronkelijk (in een niet vereenvoudigde vorm):

$$y_{\max} = \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right) [0,4714 \{250 + 18\}^{0,5} - 2,0] \quad (3.3b)$$

Zeewaarts van het punt (x_{\max} , y_{\max}) gaat het profiel over in een recht talud onder een helling van 1:12,5 tot het oorspronkelijke dwarsprofiel wordt gesneden.

In deze formules is:

- H_{0s} de significante golfhoogte op diep water [m];
- T_p de golfperiode bij de piek van het energiedichtheidsspectrum [s];
- w de valsnelheid van het duinzand in zeewater van 5° Celsius [m/s];
- x de afstand vanaf de nieuwe duinvoet [m];
- y de diepte beneden stormvloedpeil [m].

3.2.3 Aangepaste formulering (2006)

Naar aanleiding van de resultaten van het in 2006 uitgevoerde modelonderzoek is de formulering van het afslagprofiel aangepast door een relatieve periodemaat, zijnde de verhouding tussen de golfperiode T_p en de referentiewaarde van 12 s, in de formule onder te brengen (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b).

De formules (1) tot en met (3) werden daarbij in het DUROS+-model vervangen door:

$$\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)y = 0,4714 \left[\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)^{1,28} \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0,45} \left(\frac{w}{0,0268}\right)^{0,56} x + 18 \right]^{0,5} - 2,0 \quad (3.4)$$

Deze parabool loopt door tot aan het punt waarvoor geldt:

$$x_{\max} = 250 \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right)^{1,28} \left(\frac{0,0268}{w}\right)^{0,56} \quad (3.5)$$

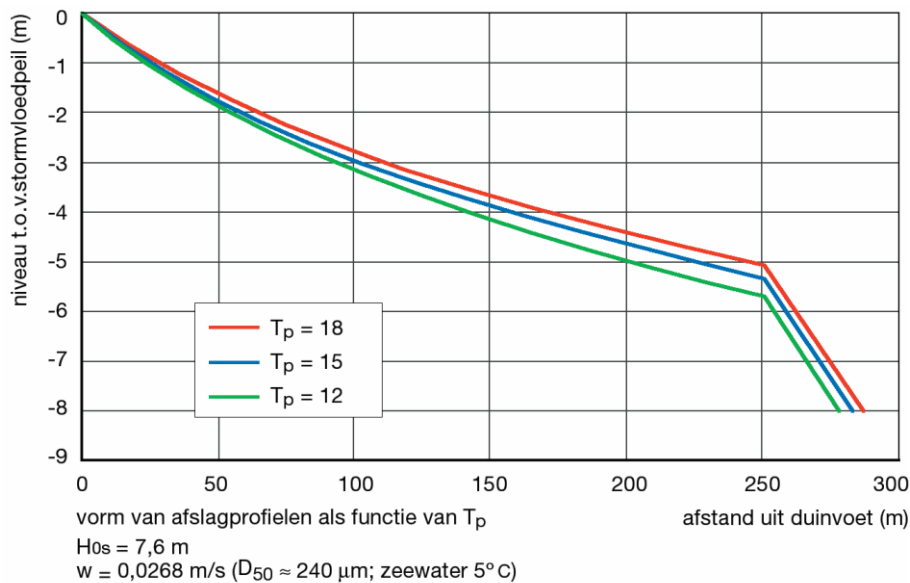
De hier aanwezige diepte beneden het stormvloedpeil is gelijk aan:

$$y_{\max} = \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right) \left[0,4714 \left\{ 250 \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0,45} + 18 \right\}^{0,5} - 2,0 \right] \quad (3.6)$$

De ten opzichte van de oorspronkelijke formulering doorgevoerde mutatie is hierin rood gemarkeerd.

Ook in het aangepaste model bevindt het nulpunt van het afslagprofiel zich ter plaatse van de duinvoet. Voor golfperiode groter dan 12 s wordt nu een veel flauwer hellend afslagprofiel gevonden (vergelijk formule (3.4) met formule (3.1)) en wordt ook de maximale diepte y_{\max} gelimiteerd (zie formule (3.6)). De ligging van het afslagprofiel verandert dus maar de (horizontaal gemeten) lengte van het afslagprofiel blijft ongewijzigd (formule (3.2) en (3.5)).

Uiteindelijk komt het erop neer dat in twee stormvloeden waarbij alleen de piekperiode verschilt, er meer duinafslag zal optreden tijdens de stormvloed met de langere golfperiode dan tijdens de stormvloed met de kortere golfperiode (zie Figuur 3.2). Het 'hoger' gelegen afslagprofiel vraagt immers om een groter depositie-volume en leidt dus tot een landwaartse verschuiving van de duinvoet en daarmee ook van het afslagpunt.



Figuur 3.2 Afslagprofielen als functie van golfperiode T_p (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid/ENW, 2007).

Ten aanzien van het gebruik van de piekperiode wordt in de TRDA2006-rapportage overigens opgemerkt dat het gebruik van de verhouding ($12/T_p$), dus met gebruik van de piekperiode, voor een duidelijk enkeltoppig spectrum een aanvaardbare benadering is.

Voor golfspectra (energiedichtheidsspectra) die duidelijk van een dergelijke enkeltoppige vorm afwijken is de periode maat $T_{m-1,0}$ een betere parameter dan de T_p -waarde, om een dergelijk golfspectrum te karakteriseren. Als er tijdens de te beschouwen stormvloed sprake is van een spectrumvorm die duidelijk afwijkt van een enkeltoppig spectrum, dient in plaats van de verhouding ($12/T_p$) in de genoemde formules de verhouding ($10,8/T_{m-1,0}$) te worden gebruikt.

3.3 Effect van golfperiode op afslaghoeveelheden

3.3.1 Inleiding

In de 2002-studie is het effect van de golfperiode op de mate van duinafslag, mede ten behoeve van de definitie van een aantal zogenaamde Zwakke Schakels langs de Nederlandse Noordzeekust, verkennend in kaart gebracht (Alkyon, 2002). Op dit moment (anno 2019) is er natuurlijk meer informatie over deze afhankelijkheid beschikbaar, zoals de resultaten van de in 2006 in de Deltagoot uitgevoerde proeven en de resultaten van het nieuwe XBeach-model.

In het volgende zijn deze bronnen/inzichten op een rij gezet. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de resultaten van modelonderzoek/gootproeven en die van rekenmodellen. In de laatste paragraaf wordt ingegaan op het resultaat van de heranalyse van de in 2006 uitgevoerde Deltagootproeven, dit mede op basis van de resultaten van de in 2018 uitgevoerde aanloopstudie (Deltares/Arcadis, 2018).

3.3.2 Resultaten gootproeven

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de proeven waarin het effect van de (langere) golfperiode is onderzocht. De hierin genoemde gidsproeven waren bedoeld als voorbereiding op het later uitgevoerde grootschalige onderzoek in de Deltagoot.

Tabel 3.1 Overzicht relevant modelonderzoek effect golfperiode op mate van duinafslag.

Onderzoek	Toelichting	Prototype-bereik piekperioden
M1819	Kleinschalig onderzoek in Scheldegoot (1982)	8,7, 10, 11 en 12 s
H4265	Kleinschalige gidsproeven (2004)	10, 12, 14,2, 16,4 en 19 s
H4357	Grootschalig onderzoek in Deltagoot (2006)	12, 15 en 18 s

M1819-onderzoek (1982)

In het systematische onderzoek naar de kenmerkende factoren voor zijn een vijftal proeven uitgevoerd die relevant zijn voor het kwantificeren van de effecten van de golfperiode (Waterloopkundig Laboratorium, 1982).

Deze, in de Scheldegoot (op diepteschaal 30) uitgevoerde proeven, zijn samengebracht in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Overzicht relevante gootproeven M1819-I-onderzoek (Opm.:*) Sterk afwijkende waarde)
(Waterloopkundig Laboratorium, 1982).

Test	H [m]	H _s [m]	T _p [s]	Steilheid [%]	Proto-T _p [s]	Afslag [m ³ /m ¹]
T01	0,700	0,164 (laag)	1,588	3,4	8,7	0,2237
T04	0,700	0,297 (hoog)	2,191	3,4	12	0,3687
T05	0,700	0,305 (hoog)	1,826	4,9	10	0,3324 ¹⁾
T06	0,700	0,304 (hoog)	2,008	4,0	11	0,3378
T13	0,700	0,163 (laag)	2,191	1,8	12	0,3221

In de tabel is naast het testnummer, de waterstand, de afgeleide diepwatergolfhoogte, de piekperiode van het spectrum en de golfsteilheid gegeven. In de voorlaatste kolom is de bijbehorende prototype-waarde van de golfperiode gegeven.

Feitelijk is er sprake van twee verschillende series, te weten:

- Het effect van de periode voor lage(re) golven (T01 en T13);
- Het effect van de periode voor hoge(re) golven (T04, T05 en T06).

In de laatste kolom is de gemeten grootte van de afslag na 6 uur (modeltijd) gegeven.

Deze resultaten geven dus alleen een beeld van de toename van de hoeveelheid afslag voor prototype-waarden van T_p tot 12 s en dus niet over het hogere bereik van de T_p-waarden.

H4265-onderzoek (WL| Delft Hydraulics, 2004)

Ter verkenning van het effect van een langere golfperiode op de mate van duinafslag zijn in 2004 enkele verkennende gidsproeven uitgevoerd in de Scheldegoot van WL Delft Hydraulics. De uitgevoerde testen bestonden uit twee testseries op respectievelijk een diepteschaal 30 (serie A) en 40 (serie B). De opzet en resultaten van deze proeven zijn samengevat in Tabel 3.3

Tabel 3.3 Overzicht gidsproeven H4265-onderzoek (WL Delft Hydraulics, 2004)

Test	n_d	H_s [m]	T_p [s]	Proto- T_p [s]	Afslag na 3 uur [m ³ /m ¹]	Afslag na 6 uur [m ³ /m ¹]
T03	30	0,300	1,83	10,0	0,246	0,347
T01	30	0,300	2,19	12,0	0,289	0,394
T02	30	0,300	2,59	14,2	0,328	0,419
T11	40	0,225	2,25	14,2	0,166	0,229
T13	40	0,225	2,59	16,4	0,190	n.b.
T12	40	0,225	3,00	19,0	0,198	n.b.

In de tabel is naast het testnummer, de diepteschaal, de golfhoogte, de piekperiode op zowel model als prototypeschaal gegeven. In de laatste kolommen is de gemeten grootte van de afslag na 3 en 6 uur (modeltijd) gegeven. Anders dan in de 1982-proeven is er hier niet gekozen voor een vaste golfsteilheid, dus per test was deze anders.

De T11-proef (op schaal 40) was daarbij bedoeld als verificatie van de T02-proef (op schaal 30). Met name de kleinste schaal gaf aanleiding tot grotere onzekerheden in de gemeten afslag, waarbij de vochtigheid van het zand effect had op de samenhang van het zandpakket en daarmee ook op de gemeten hoeveelheid afslag. Een bijkomend probleem was ook hier dat in de test met de grootste schaal ($n_d = 30$) er ook beperkingen waren als gevolg van het golfschot. In de rapportage staat hierover: "In tijdvak D in proef T01 en in tijdvak C in proef T02 bleek dat de golfmachine niet kon voldoen aan het gestuurde signaal. Hierdoor sloeg de golfmachine af. Na kleine aanpassingen aan het stuursignaal zijn deze proeven voortgezet. Hieruit blijkt dat de capaciteiten van de golfmachine in deze gevallen maximaal benut zijn." Dit betekent dat ook deze dataset beperkingen heeft.

Teneinde een relatief beeld te krijgen van de effecten van de golfperiode kan er voor de A-serie gekeken worden naar de verhoudingen tussen de voor 3 en 6 uur gemeten afslaghoeveelheden voor 10, 12 en 14,2 s. Dit leidt, ten opzichte van de 12 s test, tot een percentage van respectievelijk 87, 100 en 110 %.

Voor de B-serie wordt voor de 16,4 en 19,0 s proef een toename gevonden van respectievelijk 14 en 19 % ten opzichte van het resultaat van de 14,2 s proef (zie tabel). Aansluitend op de 110 % behorende bij de 14,2 s proef resulteert dit dus in een relatieve afslag van 126 en 131 %.

Ten opzichte van de 12 s situatie wordt op het traject 10 – 12 – 14,2 – 16,4 – 19 s dus een relatieve afslag gevonden van 87 – 100 – 110 – 126 – 131 %.

Op grond van het eerder gemelde kan niet worden uitgesloten dat het periode-effect wordt onderschat.

H4357-onderzoek (2006)

In het H4357-onderzoek uit 2006 is een aantal proeven uitgevoerd in de Deltagoot. Deze zijn zowel door een minder grote diepteschaal (schaal 6 in plaats van 30) als het hogere periodebereik extra interessant (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b).

In Paragraaf 3.3.4 wordt nog uitgebreider teruggekomen op deze resultaten.

3.3.3 Resultaten modelberekeningen

Tabel 3.4 geeft een overzicht van de rekenmodellen waarmee het effect van een (langere) golfperiode kan worden gekwantificeerd.

Tabel 3.4 Overzicht relevante rekenmodellen.

Model	Toelichting	Opmerkingen
DurosTa	Tijdsafhankelijk rekenmodel uit 1993	Relevante effectstudies uit 2002 en 2018
XBeach	Geavanceerd morfologisch model	Houdt ook expliciet rekening met lange golven

DurosTa-model

De nog steeds vigerende versie van dit rekenmodel stamt uit 1993 (Steetzel, H.J., 1993). Het rekenmodel is gebruikt in de eerste verkenning naar het effect van de golfperiode op de mate van duinafslag in 2002 (Alkyon, 2002). Een tweede fundamentele toepassing vond plaats in het kader van de aanloopstudie waarin het effect van de periode, parallel aan de XBeach-berekeningen, nogmaals is beschouwd (Deltares/Arcadis, 2018).

In vergelijking tot het later ontwikkelde XBeach-model wordt er in deze modellering niet expliciet rekening gehouden met de aanwezigheid van lange golven. In de afregeling van het model op gootproeven, welke alle betrekking hebben op golfperiodes in het lagere T_p -bereik, is dit effect echter wel impliciet verwerkt.

XBeach-model

Binnen het XBeach worden simultaan de vergelijkingen voor de waterbeweging, sedimenttransport en de verandering van de bodemligging uitgerekend. Op dit moment is XBeach geformuleerd in drie modi, met toenemende mate van detail in de beschrijving van de processen, te weten:

- De stationaire modus;
- De surfbeat modus;
- De niet-hydrostatische modus.

In de stationaire modus wordt de golfhoogte als constante (in de tijd) aangenomen. De golfhoogte wordt naar de kust voortgeplant waar het afneemt door bodemwrijving en golfbreken op ondiep water, waarmee het in feite analoog is aan SWAN maar dan in een vereenvoudigde versie voor de kustnabije toepassing. Deze modus bevat niet de essentiële fysica om het duinafslagproces te beschrijven. In de zogenaamde "surfbeat" modus (XBeach-SB) wordt de variatie van de golfhoogte op de tijdschaal van de golfgroepen uitgerekend. In de niet-hydrostatische modus (XBeach-NH) worden de individuele korte golven ook opgelost. Deze modus is nog niet gekoppeld aan sedimenttransport van zandige fracties (wel aan bodemtransport van grind) en dus nog niet geschikt voor het modelleren van duinerosie. Daarom wordt in het vervolg de XBeach "surfbeat" mode uitgewerkt. In deze mode wordt de waterbeweging in twee afzonderlijke vergelijkingen opgelost.

3.3.4 Resultaat heranalyse H4357-gootproeven

Een her-analyse van de in 2006 uitgevoerde modelproeven laat zien dat de beperkte slag van het golfschot heeft geleid tot een afwijkende mate van gebonden lange golven in het stuursignaal bij de test met de golfperiode van 18 s.

De consequentie hiervan is dat de interpretatie van de resultaten van deze proef met 18 s complexer is dan voor de andere proeven. In het volgende is de consequentie van extra duinafslag in beeld gebracht.

3.4 Algemene formulering periode-effect

3.4.1 Inleiding

In de 2006-formulering is de grootte van de macht (de α -waarde) van de $(12/T_p)$ -verhouding (in dit geval 0,45) is bepalend voor het uiteindelijke effect van een van 12 s afwijkende periode.

In meer algemene zin geldt voor de formulering van de afslagparabool:

$$\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)y = 0,4714 \left[\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)^{1,28} \left(\frac{12}{T_p}\right)^\alpha \left(\frac{w}{0,0268}\right)^{0,56} x + 18 \right]^{0,5} - 2,0 \quad (3.7)$$

Voor de maximaal bereikte diepte beneden het stormvloedpeil geldt dan:

$$y_{\max} = \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right) \left[0,4714 \left\{ 250 \left(\frac{12}{T_p}\right)^\alpha + 18 \right\}^{0,5} - 2,0 \right] \quad (3.8)$$

Afhankelijk van de α -waarde wordt het effect van de golfperiode op een andere wijze in rekening gebracht (zie Tabel 3.5)

Tabel 3.5 Overzicht modellen als functie van α -waarde in formulering afslagprofiel.

α -waarde	Implementatie	Effect
0,00	DUROS-model (1984)	Afslagprofiel en mate van duinafslag onafhankelijk van golfperiode
0,45	DUROS+-model (2006)	Specifieke toename afslag voor $T_p > 12$ s op basis van 2006-proeven
?	Werkversie model	Afwijkende toename afslag op basis van voorliggende heranalyse

3.4.2 Oorspronkelijke afleiding (2006)

Het effect van de golfperiode op de mate van afslag wordt in rekening gebracht door het gebruik van een macht (een α -waarde) in de formulering voor de vorm van het afslagprofiel.

In de formulering van het DUROS+-model is voor deze α een waarde van 0,45 gehanteerd.

Deze is gebaseerd op het resultaat van de uitgevoerde modeltesten.

Tabel 3.6 Resultaat gemeten toename afslaghoeveelheden op basis van H4357-proeven (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b).

Modeltest	Afslag voor $T_p = 12$ s [m^3/m^1]	Afslag voor $T_p = 18$ s [m^3/m^1]	Toename [%]
Basis (T1 en T3)	321	387	21
Herhaling (T6 en T5)	313	396	27
Gemiddeld	317	392	24

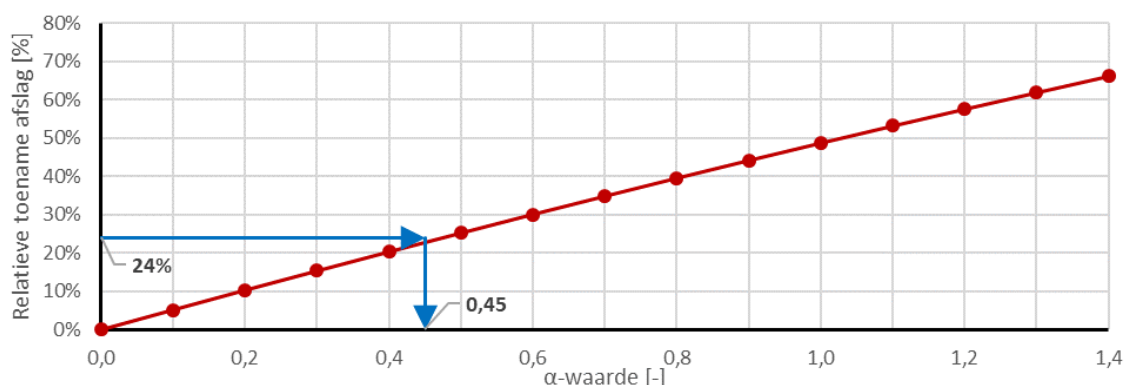
Grondslag voor deze α -waarde was de gemiddelde relatieve toename in de proeven met $T_p = 18$ s ten opzichte van de proeven met $T_p = 12$ s. Het gemiddelde van twee testcombinaties kwam daarbij uit op een toename van 24 % (zie Tabel 3.6).

Bij de definitie van de formulering met de α -macht (de zogenaamde "w12b-optie") werd in eerste instantie een waarde van 0,5 voorgesteld. Deze leidde echter tot een toename van 25 % in de afslag. Met een iets lagere waarde (namelijk 0,45) werd wel het gewenste effect bereikt, namelijk een toename in de afslag van 24 % (zie ook Tabel 3.7).

Tabel 3.7 Resultaat gebruik w12b-optie met een α -waarde van 0,45 (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b).

Formulering	Afslag voor $T_p = 12$ s [m^3/m^1]	Afslag voor $T_p = 18$ s [m^3/m^1]	Relatieve toename [%]
Optie w12b (0,45)	385	477	24

Figuur 3.3 geeft de relatie tussen de α -waarde en de hoeveelheid duinafslag zoals van toepassing is voor het zogenaamde referentieprofiel.



Figuur 3.3 Relatie tussen de grootte van de α -waarde en de relatieve toename in de hoeveelheid duinafslag voor het referentieprofiel met $H_s = 7,6$ m en $D_{50} = 240 \mu m$, inclusief de basiswaarde.

De voorliggende herkalibratie ten behoeve van de gevoeligheidsanalyse (zie volgende paragrafen) zal resulteren in een hiervan afwijkende α -waarde. Deze aangepaste waarde kan vervolgens worden gebruikt om de mogelijke effecten van deze aanpassing op de veiligheid van duinwaterkeringen te kwantificeren en geeft zo een beeld van consequentie van de laatste inzichten.

3.4.3 Herziene afleiding afslagtoename

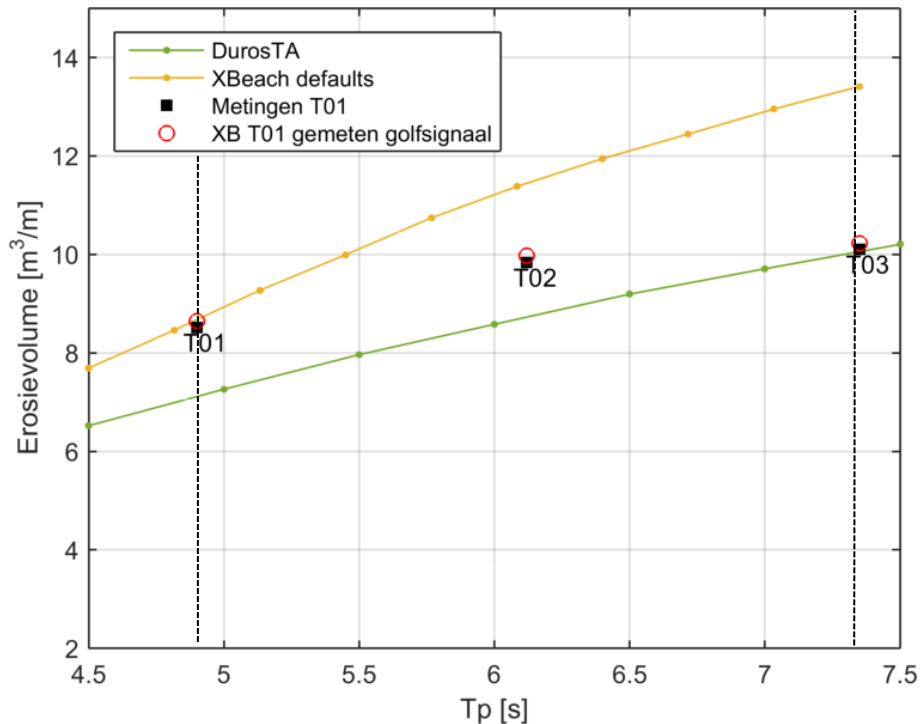
Bij de kwantificering van de α -waarde ($\alpha = 0,45$) is dus expliciet gebruik gemaakt van de resultaten van de uitgevoerde Deltagootproef (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2006b). Van deze bron wordt nu alleen het resultaat van de T01 en T02 proef, met respectievelijk T_p is 12 s en 14 s, gebruikt. Dit ondanks het feit dat ook de aansturing voor deze proeven om verklaarbare redenen niet alle gewenste gebonden lange golven bevatte.

Voor het inschatten van de consequenties van een eventuele onderschatting van de invloed van gebonden lange golf energie wordt verder gebruik gemaakt van de resultaten van zowel het DurosTA-model als van XBeach. Door het gebruik van de resultaten van de beide modellen wordt een zo goed mogelijke schatting van zowel de onzekerheid als de verwachtingswaarde van het effect van de golfperiode verkregen.

Ten aanzien van het XBeach-model gaat het zowel om de resultaten die in de aanloopstudie zijn gepresenteerd als de in het kader van de voorliggende XBeach-vervolgstudie uitgevoerde berekeningen (zie vorige hoofdstuk).

Resultaten aanloopstudie (2018)

Het resultaat van de in het kader van de aanloopstudie gemaakte berekeningen, is weergegeven in Figuur 3.4. De twee verticale stippellijnen verwijzen hierbij naar de (geschaalde) resultaten voor respectievelijk de 12 en 18 s situaties.



Figuur 3.4 Het effect van golfperiode (T_p) variatie op erosievolumes met XBeach (geel) en DurosTA (groen).

Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01, T02 en T03 in rode cirkels (Ref.: Figuur 2.7 in (Deltares/Arcadis, 2018)).

In dit figuur zijn naast de resultaten van de proeven T01, T02 en T03 ook resultaten gegeven van de rekenmodellen DurosTA en XBeach. In DurosTA is het effect van de lange golven niet expliciet gemodelleerd. Het model is afgeregeld op proeven waarin zowel lange gebonden als lange stoorgolven aanwezig waren. De afregeling was daarbij gericht op het reproduceren van de vorm van het afslagprofiel en dus niet expliciet op een reproductie van de gemeten afslaghoeveelheden. In de praktijk betekent dat per definitie dat het DurosTA-model de gemeten afslagwaarden onderschat.

Het in de figuur opgenomen DurosTA-resultaat leidt voor respectievelijk 12 en 18 s tot een afslag van 7,11 en 10,06 m³/m¹ (zie Tabel 3.8). Hierbij is overigens de reguliere porositeitscorrectie van 12 % om te komen tot een gecorrigeerde waarde van de hoeveelheid afslag boven stormvloedpeil nog niet in rekening gebracht (Steetzel, H.J., 1993). Voor het vergelijken van de afslagwaarden zouden de DurosTA-resultaten dus een factor 1,12 hoger moeten liggen en wordt een betere aansluiting op de gemeten waarden bereikt. Voor het duiden van de in dit kader beschouwde relatieve afslagwaarden is dit laatste echter niet van belang.

Tabel 3.8 Resultaten DurosTA-berekeningen (Deltares/Arcadis, 2018).

Proto- T_p [s]	T_p [s]	Afslag [m^3/m^1]	Relatieve afslag [-]
	4,50	6,52	0,92
12	4,90	7,11	1,00
	5,00	7,26	1,02
	5,50	7,97	1,12
	6,00	8,58	1,21
	6,50	9,19	1,29
	7,00	9,71	1,36
18	7,35	10,06	1,41
	7,50	10,21	1,43

De uit de DurosTa-berekeningen volgende waarde van 1,41 (rechtsonder in deze tabel) voor de verhouding tussen de afslag bij 18 en 12 s is ook genoemd in de voorverkenning naar het effect van de langere periode zoals deze in 2002 werd opgesteld (Alkyon, 2002).

Voor de verdere analyse is met name het in de figuur met 'XBeach defaults' weergegeven verband van belang. Deze heeft betrekking op het aansturen van het rekenmodel met het oorspronkelijk bedoelde golfspectrum in combinatie met de default settings.

Tabel 3.9 Resultaten XBeach-berekeningen met default-settings voor zowel de ondiep als de diepwateraansturing, waarbij de voor de ondiep water aansturing gegeven waarden in Figuur 3.4 zijn gebruikt (Deltares/Arcadis, 2018), (Deltares, 2019b).

Proto- T_p [s]	T_p [s]	Afslag_ondiep [m^3/m^1]	Afslag_diep [m^3/m^1]	Relatieve afslag-diep [-]
	4,50	7,69	7,71	0,89
	4,82	8,46	8,48	0,98
12	4,90	8,68	8,67	1,00
	5,13	9,27	9,22	1,06
	5,45	9,99	9,80	1,13
	5,77	10,74	10,35	1,19
	6,08	11,38	10,90	1,26
	6,40	11,95	11,46	1,32
	6,72	12,44	11,97	1,38
	7,03	12,95	12,49	1,44
18	7,35	13,41	12,89	1,49

Aanvullende XBeach-berekeningen (2019)

Het in de figuur gepresenteerde 'XBeach defaults'-verband heeft betrekking op berekeningen waarbij de diepwaterrand was gelegen op 4,5 m waterdiepte. Dit leidde op het interval van 12 tot 18 s tot een toename van de afslag van 8,68 tot 13,41 m^3/m^1 (zie Figuur 3.4 en de derde kolom van Tabel 3.9).

Door het opleggen van een randvoorwaarde op relatief ondiep water leiden de interne formuleringen van het XBeach-model echter tot een overschatting van de laagfrequente energie (Deltares, 2019b). Dit is ook de reden dat er in het kader van de vervolgitwerkingen aanvullende XBeach-berekeningen zijn uitgevoerd waarbij de diepwaterrand is gelegd op 14,5 m waterdiepte (modelschaal). De resultaten van deze aanvullende berekeningen zijn opgenomen in de vierde kolom van Tabel 3.9 (Deltares, 2019b).

Voor de 18 s som wordt nu inderdaad een iets geringere afslag gevonden. Indien het gebruik van de diepwaterrand als maatgevend wordt gehanteerd leidt een toename van de periode van 12 naar 18 s dus tot 49 % extra afslag.

Het resultaat van een XBeach-berekening is ook afhankelijk van de gehanteerde settings. In het kader van de nadere uitwerkingen zijn daarom ook nog enkele berekeningen uitgevoerd met de zogenaamde 'Van Thiel de Vries'-settings (VThdV). Ook zijn hier weer de resultaten gegeven voor de twee randvoorwaarde-locaties.

Tabel 3.10 Resultaten XBeach-berekeningen met VThdV-settings (Deltares, 2019b).

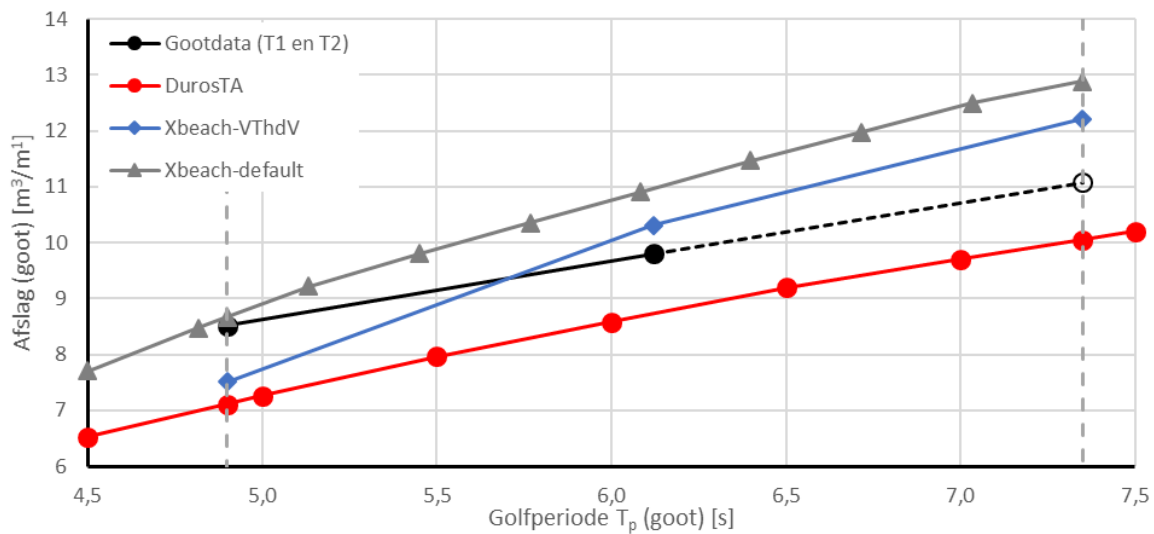
Proto- T_p [s]	T_p [s]	Afslag_ondiep [m ³ /m ¹]	Afslag_diep [m ³ /m ¹]	Relatieve afslag-diep [-]
12	4,90	7,24	7,51	1,00
15	6,12	10,28	10,31	1,37
18	7,35	13,19	12,21	1,63

Voor de maatgevend aangenomen diepwatervariant leidt dit op het interval van 12 tot 18 s tot een toename van de afslag van 7,51 tot 12,21 m³/m¹ (zie vierde kolom van Tabel 3.9), ofwel een toename van 63 %.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de mate van gebonden lange-golf energie is in hoge mate afhankelijk van de hoeveelheid richtingsverspreiding, zie ook het vorige hoofdstuk. Om een realistische schatting van de gebonden lange-golf energie te maken moest niet alleen de rand van XBeach berekeningen op diep water worden gelegd (zie Hoofdstuk 1) maar moet tevens een realistische maat voor de richtingsverspreiding worden gebruikt in een 2D mode van XBeach. Aangezien de richtingsverspreiding de mate van gebonden lange golf energie verlaagd, leiden berekeningen zonder richtingsverspreiding tot een overschatting van de mate van duinafslag. In de gootomstandigheden is per definitie natuurlijk geen sprake van richtingsverspreiding en voor het doorrekenen van dergelijke proeven is dat ook niet aan de orde.

Combinatie van gegevens

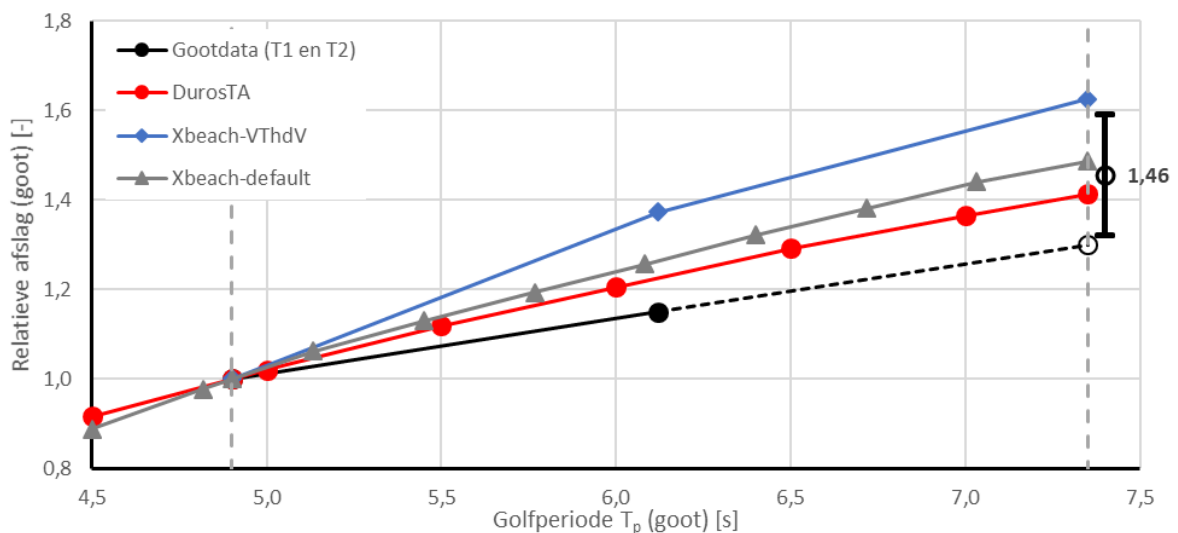
In Figuur 3.5 zijn de drie eerder toegelichte, op diep water aansturing gebaseerde, modelresultaten grafisch weergegeven. Heranalyse van de Deltagootproeven leidde tot de conclusie dat de aansturing voor met name de '18 s proef' aangepast was ten opzichte van de andere proeven. Dit gold in veel mindere mate voor de '15 s proef', vandaar dat ook als extra inzicht gebruik is gemaakt van een (lineaire) extrapolatie van de voor 12 en 15 s gemeten afslagwaarden, zoals aangegeven door de zwarte stippellijn in de grafiek.



Figuur 3.5 Overzicht beschikbare informatie over toename afslag bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapolerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings).

Relatieve afslagtoename

Omdat de interesse met name uit gaat naar de relatieve toename in de afslaghoeveelheden is de in deze figuur opgenomen informatie verwerkt tot een figuur waarbij op de verticale as de relatieve afslag ten opzichte van het '12 s resultaat' van elk van de modellen is gegeven (zie Figuur 3.6).



Figuur 3.6 Overzicht beschikbare informatie over relatieve afslagwaarden bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapolerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings).

Een en ander leidt tot de in Tabel 3.11 maar ook in deze figuur gegeven eindconclusies.

Tabel 3.11 Gebruikte bronnen voor maatgevende verhouding.

Bron	Toelichting	Relatieve toename [%]
Deltagootproef	Verhouding op basis van gemeten verschil 12 en 15 s	30
DurosTA	Verhouding resultaat 12 en 18 s (aanloopstudie)	41
XBeach (default)	Verhouding resultaat 12 en 18 s (huidige studie)	49
XBeach (VThdV)	Verhouding resultaat 12 en 18 s (huidige studie)	63
Gemiddeld		46

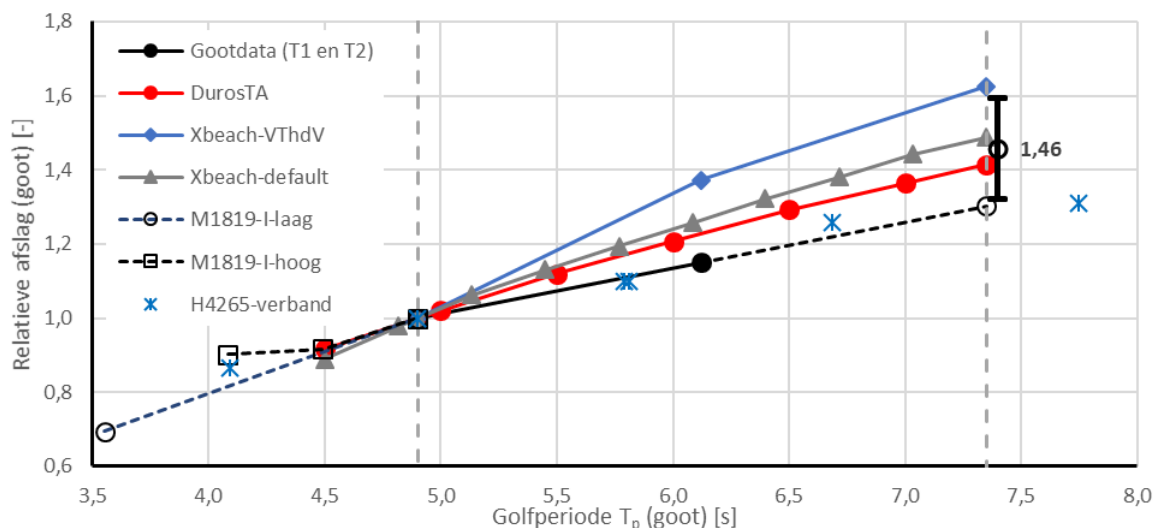
De toename van de hoeveelheid afslag tussen 12 en 18 s bedraagt dus tussen grofweg 30 en 60 % en is gemiddeld 46 % (met een standaardafwijking van 14 %) onder de aanname dat alle bronnen hierbij gelijk gewogen kunnen worden. Een afwijkende weging zou weliswaar leiden tot een qua relatieve toename iets afwijkend resultaat, maar ook tot de conclusie leiden dat er een significant verschil ontstaat ten opzichte van de huidige methodiek.

We nemen dit percentage als uitgangspunt voor de gevoeligheidsanalyses in dit hoofdstuk.

Ten opzichte van de vigerende Duros+-methodiek waarin rekening is gehouden met een toename van 24 %, is dit bijna een verdubbeling en resulteert dit dus in een toename van 6 tot 29 procentpunt en dus gemiddeld 17 procentpunt extra afslag bij een golfperiode van 18 s.

Aanvullende validatie van het gehanteerde verband

Ter validatie van het in Figuur 3.6 gegeven verband zijn in deze figuur nu ook nog de relatieve resultaten voor de M1819-I (1982) en H4265 (2006) proeven toegevoegd (zie ook Paragraaf 3.3.2). Het resultaat hiervan is gegeven in Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Overzicht beschikbare informatie over relatieve afslagwaarden bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapoleerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings), inclusief de resultaten van het M1819-I-onderzoek uit voor het lagere periodebereik.

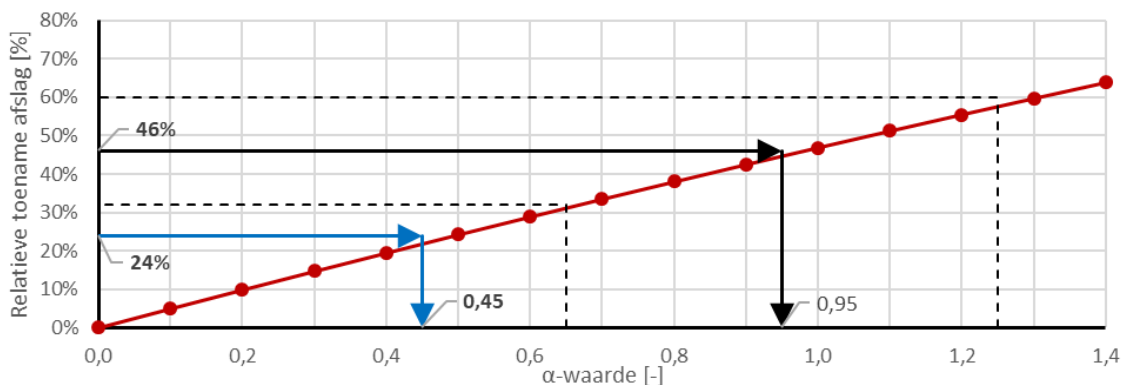
Deze toevoeging lijkt de nu gevonden lineaire trend te onderbouwen. Wel valt op dat een van de M1819-I-proeven uit 1982 (namelijk het resultaat van de T05-test) hier duidelijk van af wijkt, maar dit kon ook al worden geconstateerd naar aanleiding van de in Tabel 3.2 opgenomen afslagwaarden.

In de figuur is ter illustratie ook het naar Deltagoot-omstandigheden op vergelijkbare wijze vertaalde resultaat van de H4265-gidsproeven opgenomen. Deze vallen samen met de onderrand van het afgeleide verband.

3.4.4 Bepaling aangepaste α -waarde t.b.v. gevoeligheidsanalyse

De bepaling van de gevoeligheid van een wijziging in de hoeveelheid afslagtoename (van 24 naar 46, plus of min 14 %) vraagt ook om een aangepaste grootte van de α -waarde. De wijze waarop een wijziging in deze α -waarde voor het referentieprofiel doorwerkt in de relatieve toename van de hoeveelheid duinafslag is weergegeven in Figuur 3.8 en Figuur 3.9.

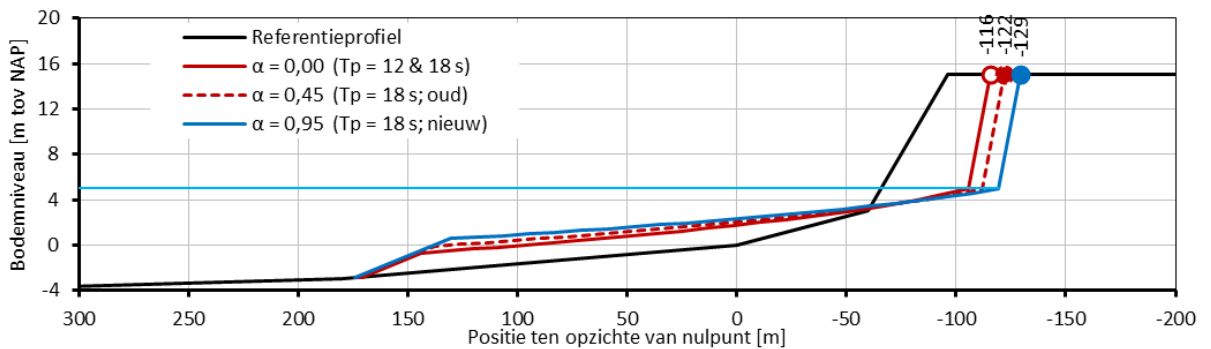
In de eerste figuur is dit uitgewerkt voor de zogenaamde basiscondities die behoren bij de oorspronkelijke formulering van het Duros-model. Hierbij valt het effect van de golfhoogte ($H_s = 7,6$ m) en het korrelmateriaal ($D_{50} = 240$ μm en dus $w_s = 0,0268$ m/s) weg.



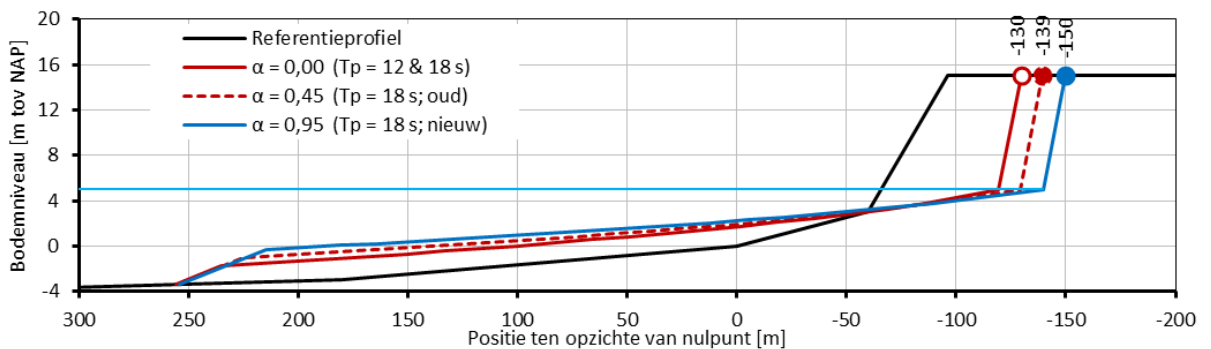
Figuur 3.8 Relatie tussen de grootte van de α -waarde en de relatieve toename in de hoeveelheid duinafslag voor het referentieprofiel voor $H_s = 7,6$ m en $D_{50} = 240$ μm .

De blauwe pijlen verwijzen naar de vigerende uitwerking waarbij de α -waarde volgt bij een afslagtoename van 24%. Een toename van 46% (de zwarte pijlen in de figuur) vraagt om een α -waarde van 0,95. De onzekerheid in de afslagtoename (32 tot 60 %) leidt ook tot een range van te gebruiken α -waarden (van 0,65 tot 1,25). Voor de gevoeligheidsanalyse zal worden uitgegaan van een α -waarde van 0,95. In de eindconclusie zal evenwel ook de onzekerheid in deze aanname worden betrokken.

In Figuur 3.9 en Figuur 3.10 is het effect op de mate van duinafslag gegeven voor respectievelijk de basis (met de condities die passen bij de oorspronkelijke formulering waarin bijvoorbeeld een golfhoogte van 7,6 m in is gebruikt) en de referentiecondities (zoals deze zijn gebruikt als typische diepwaterconditie met een iets grotere golfhoogte van 9,0 m) voor de veronderstelde extra afslag van 46 % (en dus $\alpha = 0,95$). De grootte van de afslag neemt toe met een verlenging en verflauwing van de afslagparabool.



Figuur 3.9 Effect van de α -waarde op de hoeveelheid duinafslag voor $H_s = 7,6$ m en $D_{50} = 240 \mu\text{m}$.

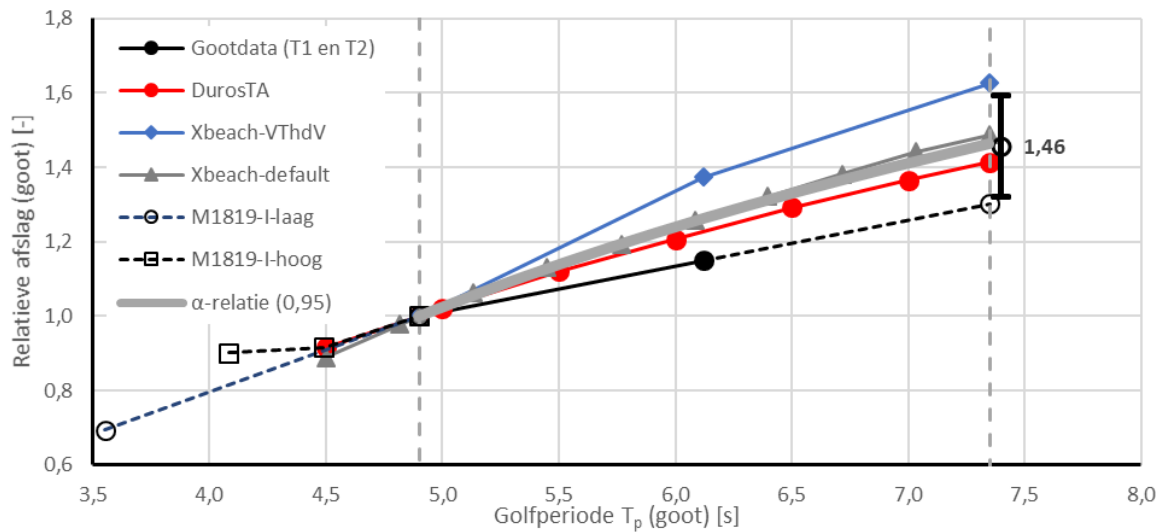


Figuur 3.10 Effect van de α -waarde op de hoeveelheid duinafslag voor $H_s = 9,0$ m en $D_{50} = 200 \mu\text{m}$.

Het hanteren van het aangepaste model leidt, afhankelijk van de condities tot een landwaartse verschuiving van het (deterministische) afslagpunt over 7 tot 11 m. Dit laatste geldt natuurlijk voor het relatief hoge referentieprofiel. Met name een lagere kruin zal leiden tot een vergroting van dit effect.

3.4.5 Validatie gebruik α -relatie

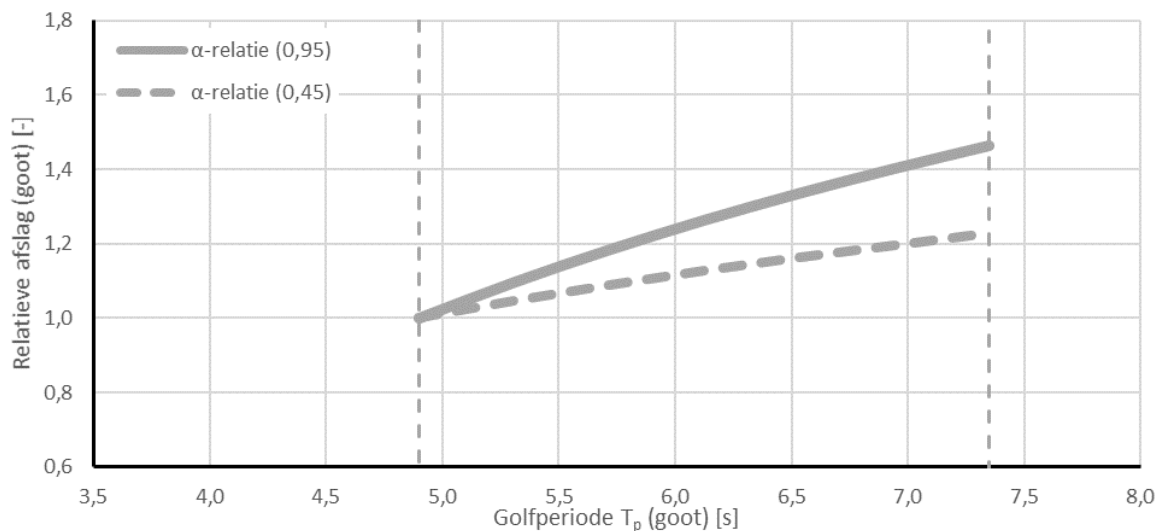
In het voorgaande is de grootte van de α -waarde gebaseerd op de afslagtoename voor een prototype golfperiode van 18 s. Voor 12 s sluit de uitwerking per definitie aan op het standaardresultaat van de vroegere uitwerking waarbij het effect van de lange golven bovendien minder van belang is.. Door uitgaande van de geselecteerde waarde de relatieve afslagvolumes op het interval tussen 12 en 18 s te berekenen kan het resultaat daarvan worden toegevoegd aan de eerder gepresenteerde validatiefiguur (zie Figuur 3.7). Het resultaat hiervan is gegeven in Figuur 3.11 en laat zien dat het α -verband ook het eerder afgeleide verband op het traject tussen 12 en 18 s goed volgt.



Figuur 3.11 Overzicht beschikbare informatie over relatieve afslagwaarden bij grotere piekperiodes op basis van (geëxtrapoleerde) gootdata en de resultaten van DurosTA en XBeach (voor twee verschillende settings), inclusief de resultaten van het M1819-I-onderzoek uit voor het lagere periodebereik en het uiteindelijke geïmplementeerde α -verband.

Ook blijkt dat het verband netjes in het verlengde ligt van de relatieve resultaten van het M1819-I-onderzoek.

De nieuwe relatie (met een α -waarde van 0,95) leidt in vergelijking tot het vigerende verband (met een α -waarde van 0,45) dus tot een duidelijke toename van de hoeveelheid afslag (zie Figuur 3.12)



Figuur 3.12 Vergelijking nieuwe relatie (met een α -waarde van 0,95) met het in vergelijking tot het vigerende verband (met een α -waarde van 0,45).

3.5 Bepaling aangepast rekenmodel t.b.v. gevoeligheidsanalyse

3.5.1 Deterministisch

Conform de eerder gedefinieerde aanpak zijn de nieuwe inzichten in het effect van de golfperiode op de mate van duinafslag ten behoeve van deze verkenning verwerkt in een beperkt aangepaste versie van het rekenmodel.

Voor het deterministisch kunnen doorrekenen van het verbeterde inzicht in de golfperiode is een aangepaste werkversie van het Duros+ model geformuleerd. De eerste resultaten van dit model zijn reeds getoond in de voorafgaande figuren.

3.5.2 Probabilistisch

Als derde onderdeel van de 2006-studie is de implementatie van het Duros+ model in een semi-probabilistische setting uitgewerkt (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2007).

De conclusie hiervan was dat veel van de oorspronkelijke 1984-elementen konden worden gehandhaafd (Van de Graaff, 1984).

Voor deze gevoeligheidsanalyse veronderstellen we dat het aanpassen van de α -parameterwaarde in het Duros+-model niet tot een andere conclusie zal leiden. Een en ander betekent dan ook dat de vigerende TRDA2006-methodiek ook met dit ten behoeve van deze verkenningen geformuleerde kernmodel kan worden gebruikt.

3.6 Voorbeelddoorrekeningen

3.6.1 Inleiding

In de 2006-studie zijn berekeningen uitgevoerd voor een groot aantal verschillende profielen en condities. Het ging daarbij om een tiental locaties langs de Hollandse kust en vijf Waddenkustlocaties. Daarbij is gekeken wat het effect is van de overstap van het 1984-model naar de TRDA2006-model (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2007).

3.6.2 Beschouwde dwarsprofielen en randvoorwaarden

In de voorliggende uitwerking is (in eerste instantie) de zelfde set berekeningen gehanteerd. Het gaat daarbij om de in Tabel 3.12 gegeven profielen. Deze profielen hebben enkel en alleen betrekking op de Hollandse kust en de Waddeneilanden omdat daar sprake is van langere golfperiodes. Voor de Zeeuwse kust speelt dit niet omdat daar de golfperiode buiten het interessebereik ($T_p > 12$ s) valt.

In de 2006/2007-studie zijn naast de lokale profielen ook berekeningen uitgevoerd voor het referentieprofiel in combinatie met de lokale condities uit Tabel 3.12 en een factor 10 minder zware omstandigheden (voor het lokale profiel).

In de voorliggende uitwerking zijn dezelfde dwarsprofiel-locaties gehanteerd en is in eerste instantie alleen gebruik gemaakt van dezelfde profielen en dezelfde set van (HR2006) randvoorwaarden. Door de berekeningen zowel voor een α -waarde van 0,45 als 0,95 te maken wordt een beeld verkregen van het effect van de additionele afslag.

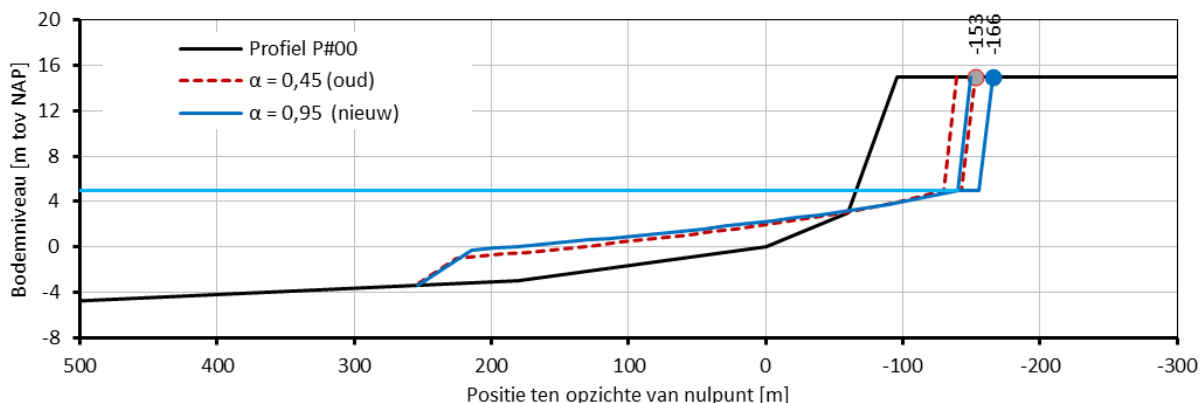
Tabel 3.12 Overzicht te beschouwen dwarsprofielen inclusief hydraulische randvoorwaarden (cf. Tabel 6.5 uit (WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft, 2007)).

Nr	Locatie	Km-raai	h [m]	H _s [m]	T _p [s]	D ₅₀ [μm]	Opm.
#00	Referentieprofiel	n.v.t.	5,00	9,00	18,00	200	Referentie
#01	Den Helder	3,08	4,80	10,47	16,27	229	Hollandse kust
#02	Botgat	9,28	4,90	10,38	16,25	254	Idem
#03	Zwanenwater	14,83	5,00	10,27	16,23	250	Idem
#04	Tweede Korftwater	19,55	5,10	10,17	16,21	238	Idem
#05	Egmond	37,75	5,40	9,65	16,11	244	Idem
#06	Zandvoort	66,25	5,80	9,06	15,57	181	Idem
#07	Noordwijk	81,75	5,80	8,68	14,64	218	Idem
#08	Scheveningen	99,75	5,70	8,31	13,75	209	Idem
#09	Monster	111,96	5,70	7,92	12,80	211	Idem
#10	Hoek van Holland	118,25	5,60	7,71	12,29	251	Idem
#11	Texel	18,53	4,40	10,50	16,48	192	Waddenkust
#12	Vlieland	43,77	4,20	10,72	17,02	192	Idem
#13	Terschelling	17,00	4,20	10,68	17,82	186	Idem
#14	Ameland	10,00	4,40	10,66	18,43	167	Idem
#15	Schiermonnikoog	7,00	4,70	10,63	19,09	162	Idem

3.6.3 Detailresultaten duinafslagsommen

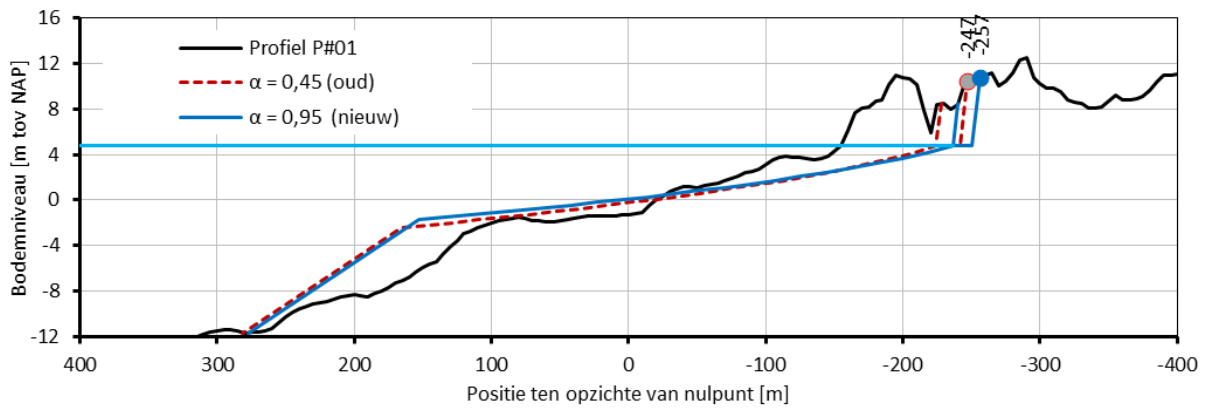
In de volgende figuren zijn de resultaten van de per profiel uitgevoerde berekeningen in detail weergegeven. Per profiel is zowel het oude als het nieuwe afslagprofiel (behorende bij een afslagtoename van 46 % ten opzichte van de 12 s situatie) gepresenteerd en zijn ook de posities van de beide afslagpunten gegeven. Elk van deze afslagprofielen bestaat in basis uit een balansdeel zijnde de afslagparabool beneden de stormvloedpeil, het 1 : 12,5 overgangstalud aan de zeezijde en het 1 : 1 afslagfront aan de landzijde. Landwaarts van dit laatste profieldeel is een toeslagvolume ingepast met wederom een 1 : 1 afslagfront en de positie van het maatgevende afslagpunt op kruinniveau. Boven het stormvloedpeil vertoont het afslagprofiel dus twee lijnen.

Dit laatste was niet mogelijk voor profiel P#12 (Vlieland) waar zowel in de oude als in de nieuwe situatie sprake is van een doorbrekende duinregel (zie Figuur 3.25).

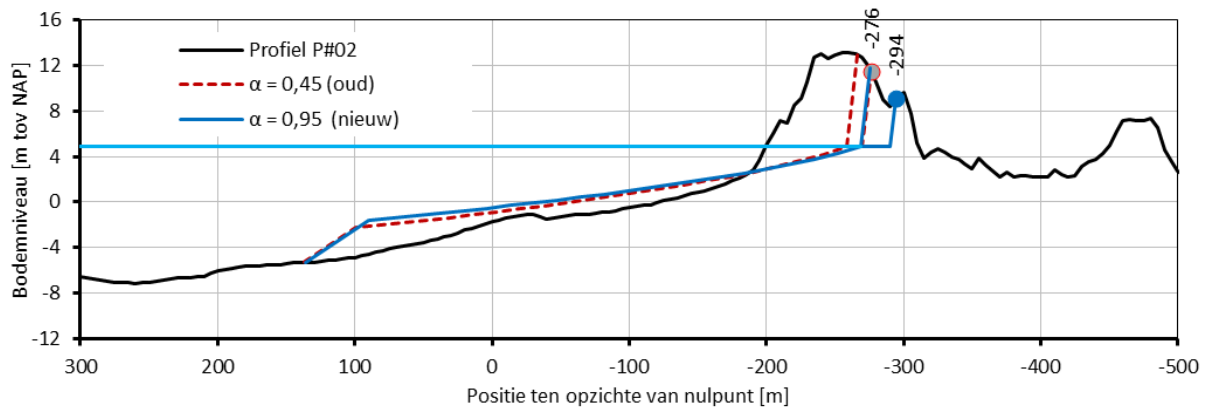


Figuur 3.13 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor het referentieprofiel (P#00).

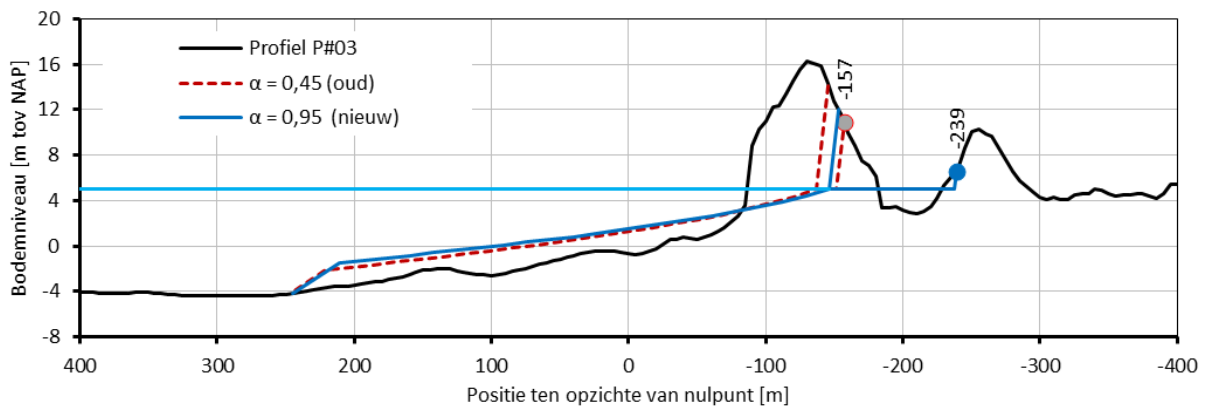
11203720-013-GEO-0002, 10 juli 2019, definitief



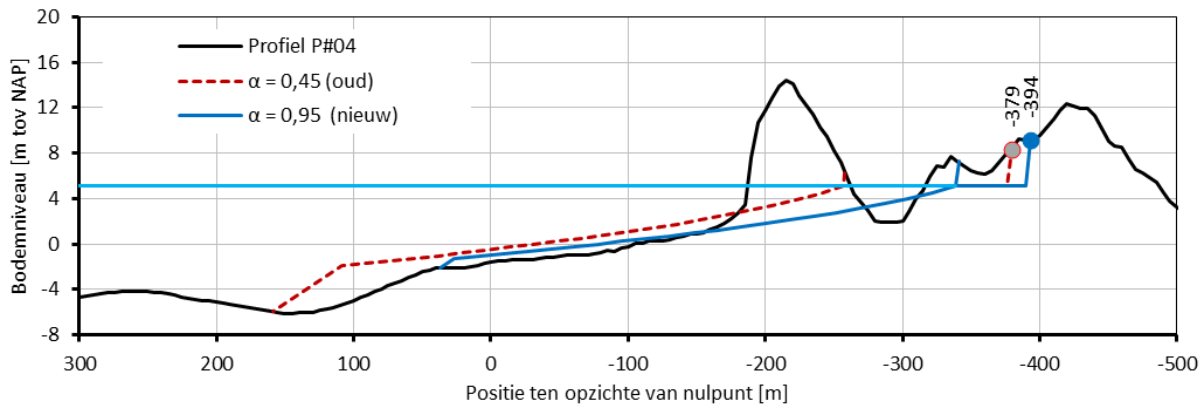
Figuur 3.14 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#01.



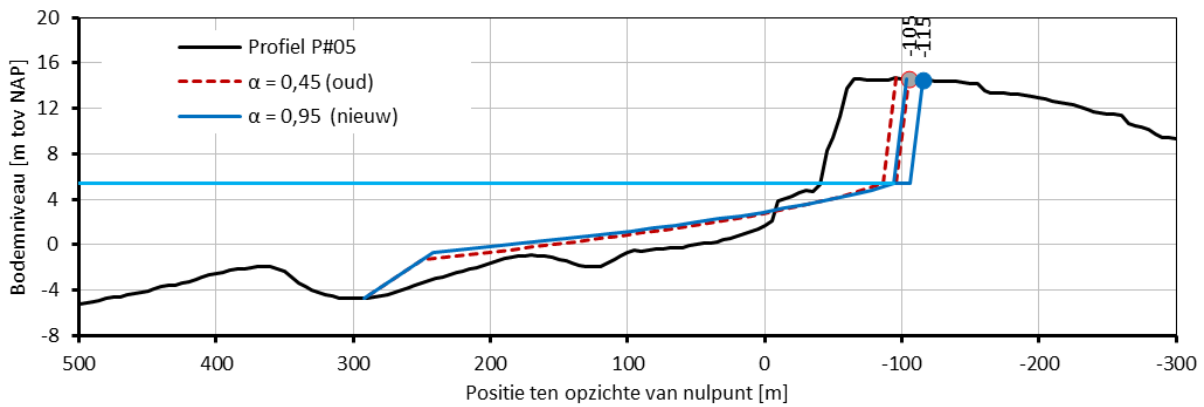
Figuur 3.15 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#02.



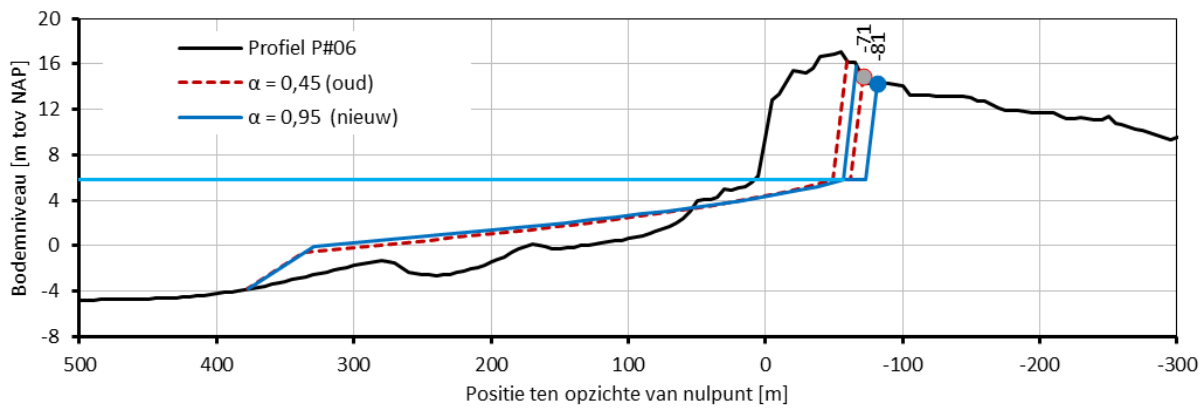
Figuur 3.16 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#03.



Figuur 3.17 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#04.

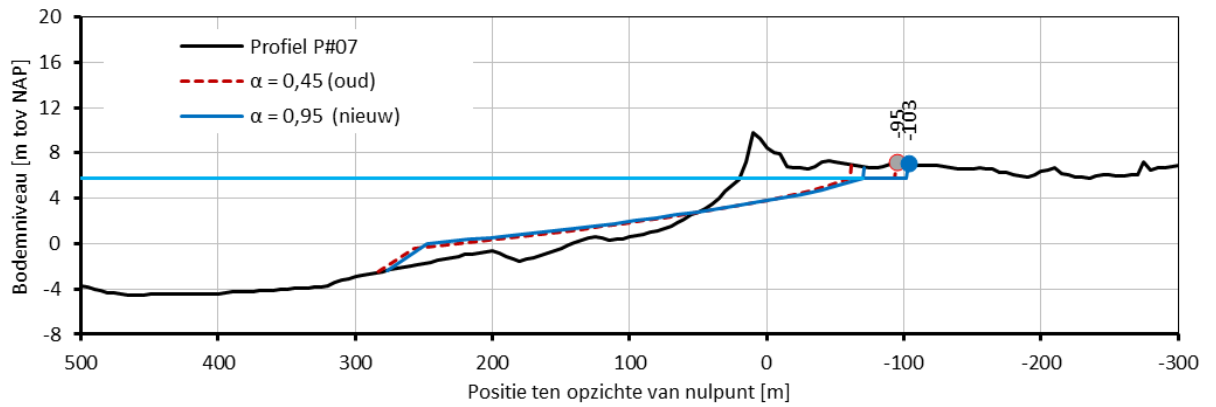


Figuur 3.18 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#05.

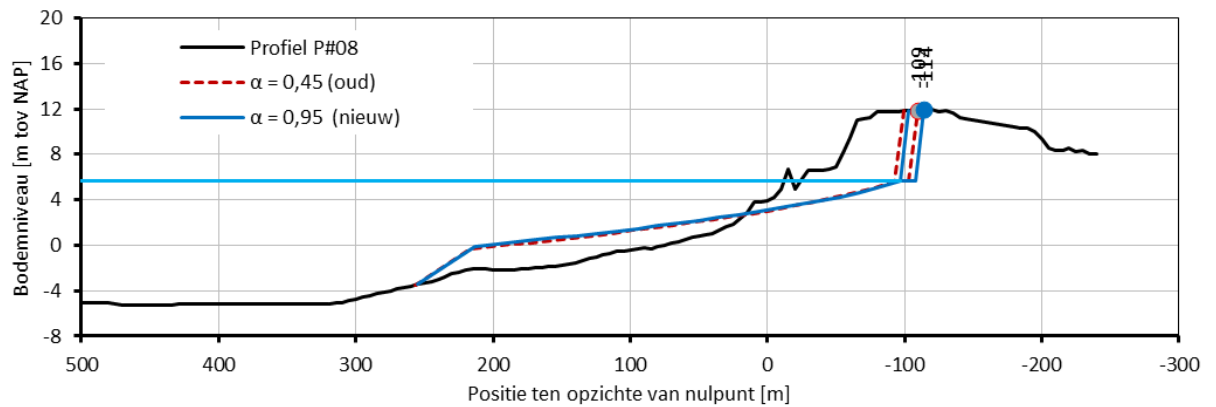


Figuur 3.19 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#06.

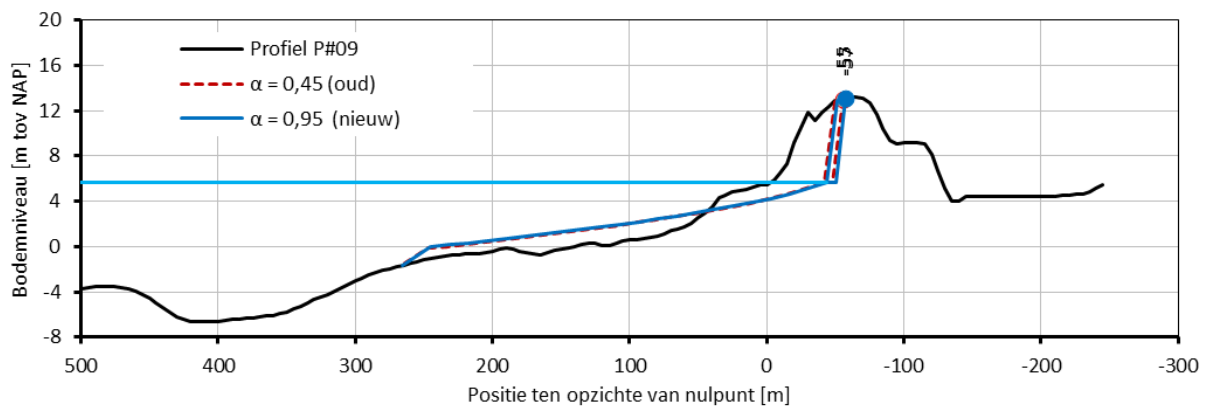
11203720-013-GEO-0002, 10 juli 2019, definitief



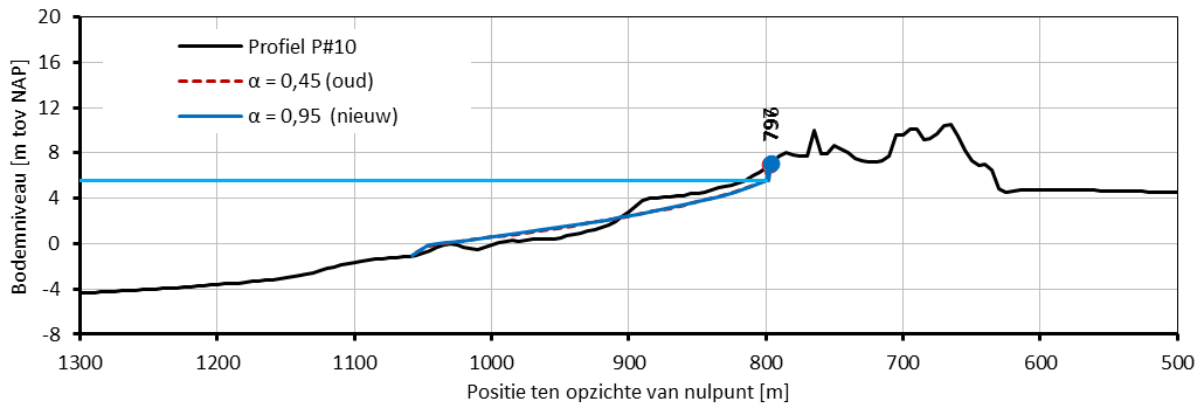
Figuur 3.20 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#07.



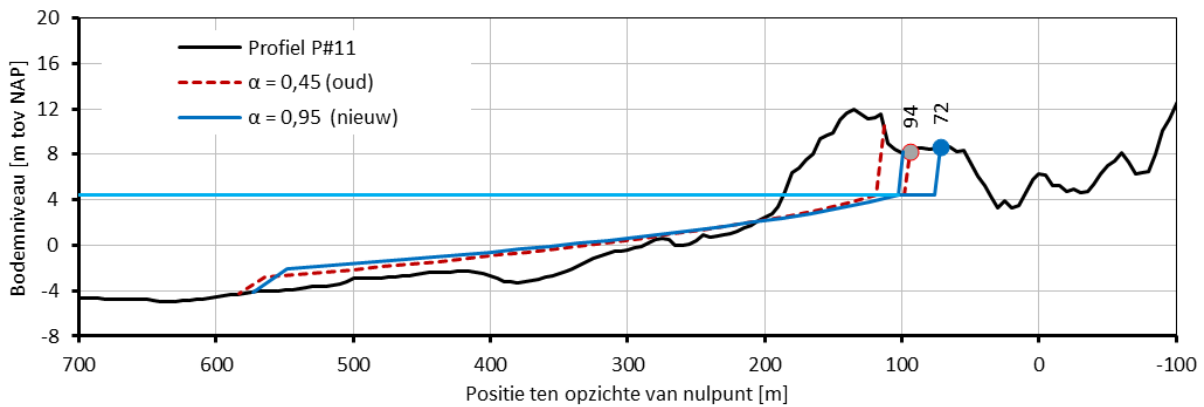
Figuur 3.21 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#08.



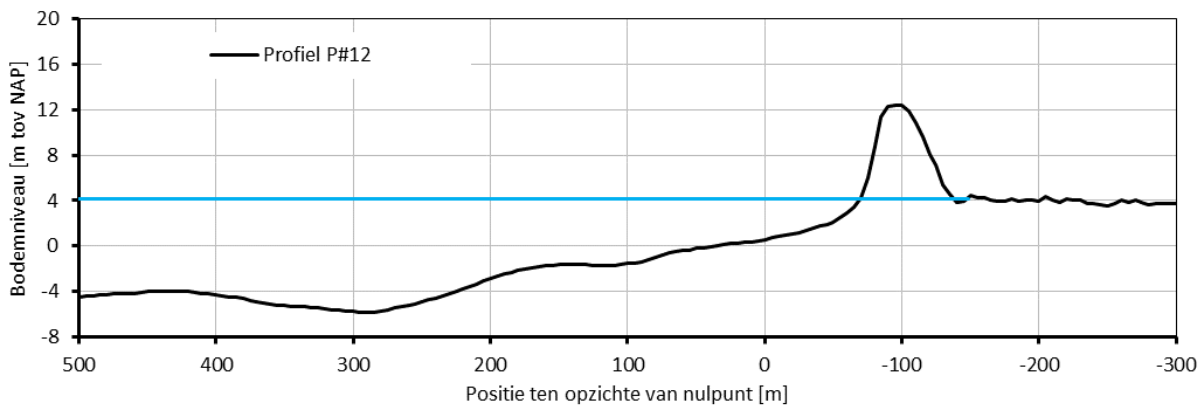
Figuur 3.22 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#09.



Figuur 3.23 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#10.

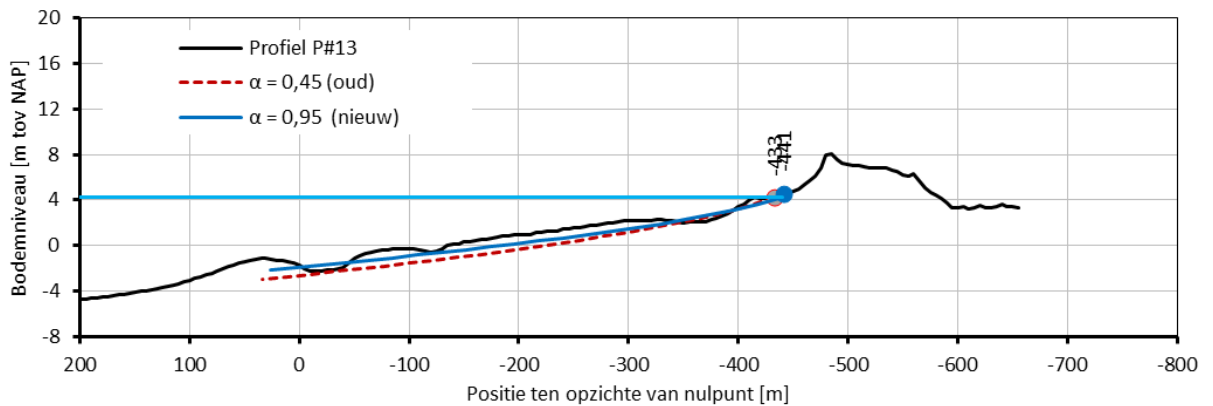


Figuur 3.24 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#11.

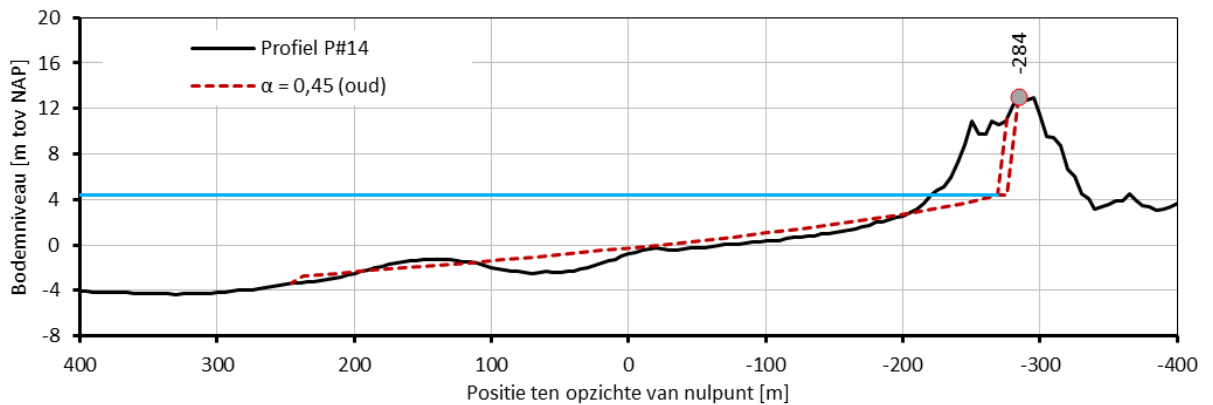


Figuur 3.25 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#12.

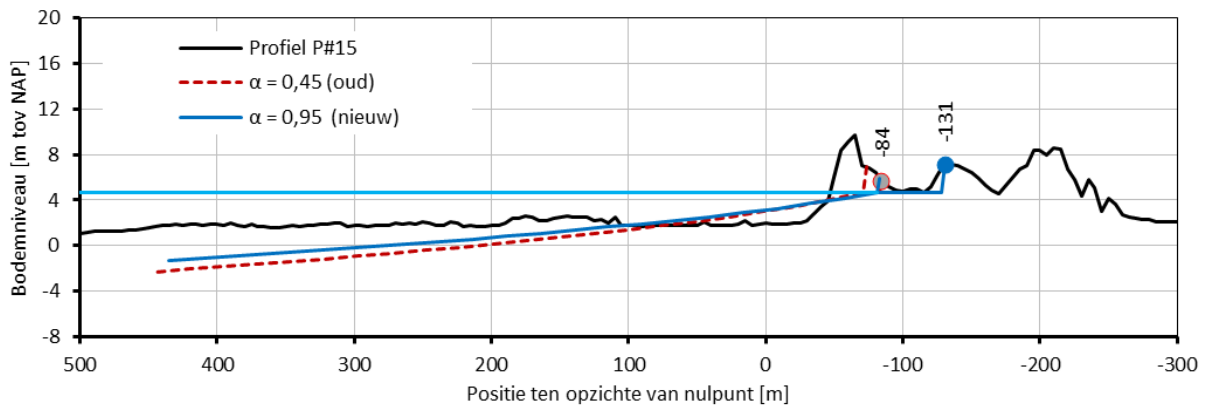
11203720-013-GEO-0002, 10 juli 2019, definitief



Figuur 3.26 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#13.



Figuur 3.27 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#14.



Figuur 3.28 Resultaat duinafslagberekening voor de oude en de nieuwe situatie voor profiel P#15.

3.6.4 Overzicht resultaten afslaghoeveelheden en -afstanden

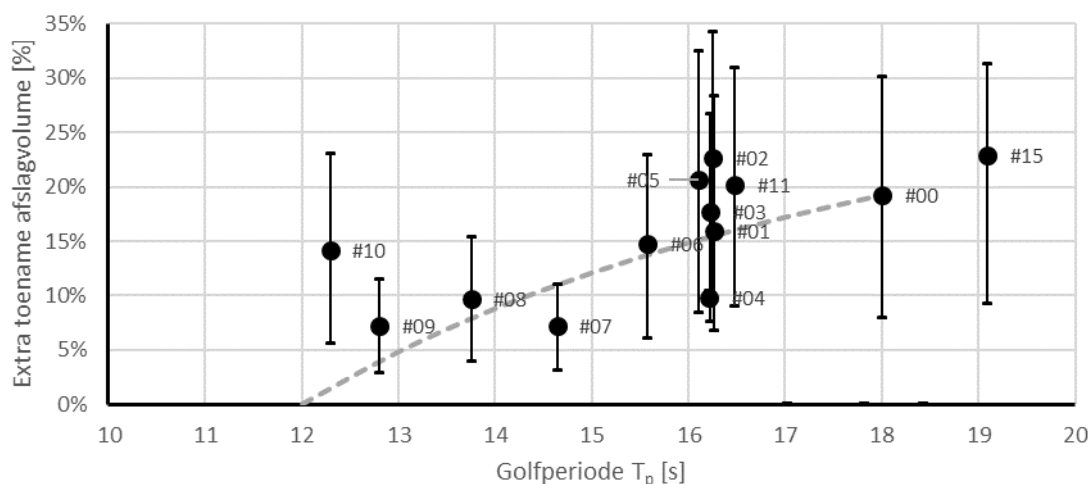
De resultaten van de uitgevoerde berekeningen zijn samengebracht in Tabel 3.13. In deze tabel zijn de totale afslaghoeveelheden opgenomen, dus inclusief de toeslag. Hierbij is dus uitgegaan van de verwachtingswaarde van de α -parameter.

Tabel 3.13 Overzicht resultaten berekende afslaghoeveelheden in oude en nieuwe situatie, inclusief absolute en relatieve verschillen (uitgaande van $\alpha = 0,95$). (n.b.: niet beschikbaar).

Nr	Afslag oud [m ³ /m ¹]	Afslag nieuw [m ³ /m ¹]	Toename [m ³ /m ¹]	Toename [%]	Opm.
#00	668	796	129	19%	Referentiesituatie
#01	339	393	54	16%	
#02	421	517	95	23%	
#03	551	649	98	18%	
#04	532	584	52	10%	
#05	452	545	93	21%	
#06	643	738	95	15%	
#07	169	181	12	7%	
#08	315	345	30	10%	
#09	206	221	15	7%	
#10	10	12	1	14%	
#11	449	540	91	20%	
#12	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	Profiel breekt sowieso door
#13	0	1	1	n.b.	Afslagprofiel niet goed inpasbaar
#14	249	n.b.	n.b.	n.b.	Profiel breekt in nieuwe som door
#15	103	127	24	23%	

Bij het buiten beschouwing laten van het resultaat voor het referentieprofiel (#00) varieert de extra afslag ten opzichte van de huidige situatie tussen de 1 en 98 m³/m¹ met een gemiddelde toename van 51 m³/m¹. De procentuele toename in de hoeveelheid afslag varieert tussen de 7 en 23 % met een gemiddelde van 15 %.

Deze waarde ligt iets onder de waarde die eerder is genoemd voor het referentieprofiel. De prototype-waarden worden immers mede bepaald door de lokaal aanwezige golfperiode. Voor locatie waarvoor de golfperiode weinig afwijkt van 12 s zal er slechts een beperkte toename zijn van de hoeveelheid afslag. Dit laatste is ook zichtbaar in Figuur 3.29 waarin de toename van de hoeveelheid afslag per locatie is uitgezet als functie van de golfperiode. In aanvulling op in de tabel weergegeven resultaten (behorende bij $\alpha = 0,95$) is hierin ook de spreidingsband aangegeven die behoort bij de lage en hoge schatting van deze waarde.



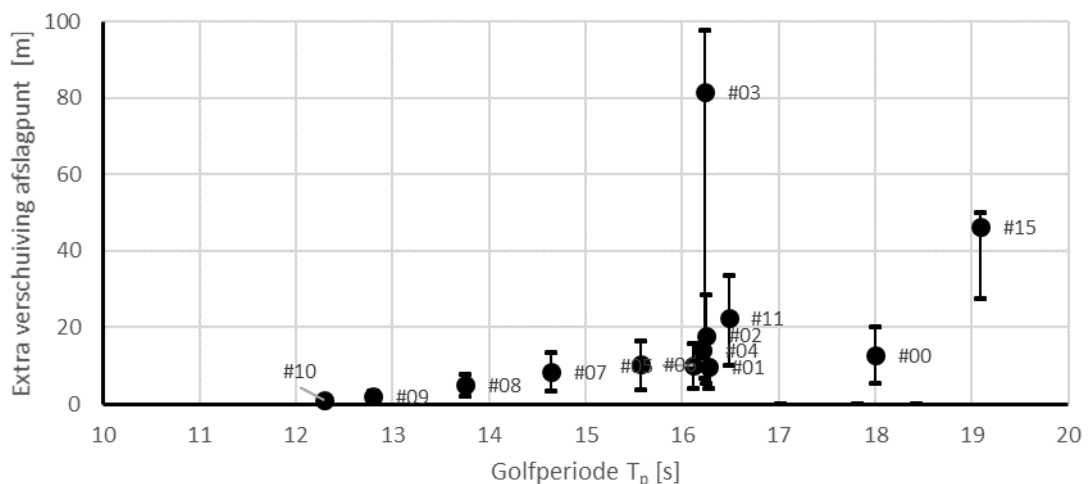
Figuur 3.29 Relatie tussen golfperiode en afslagtoename per beschouwde locatie, inclusief het geïmplementeerde verband voor het referentieprofiel, uitgaande van $\alpha = 0,95$ inclusief de van toepassing zijde spreiding.

Tabel 3.14 Overzicht resultaten berekende afslagafstanden in oude en nieuwe situatie, inclusief absolute en relatieve verschillen (uitgaande van $\alpha = 0,95$).

Nr	Positie oud [m t.o.v. Ref.]	Positie nieuw [m t.o.v. Ref.]	Verschuiving [m]	Verschuiving [%]	Opm.
#00	-153	-166	13	17%	Referentiesituatie
#01	-247	-257	10	11%	
#02	-276	-294	18	28%	
#03	-157	-239	82	154%	
#04	-379	-394	14	8%	
#05	-105	-115	10	16%	
#06	-71	-81	10	13%	
#07	-95	-103	8	8%	
#08	-109	-114	5	6%	
#09	-55	-57	2	4%	
#10	797	796	1	9%	
#11	94	72	23	27%	
#12	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	Profiel breekt sowieso door
#13	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	Afslagprofiel niet goed inpasbaar
#14	-284	n.b.	n.b.	n.b.	Profiel breekt in nieuwe som door
#15	-84	-131	46	171%	

In Tabel 3.14 zijn de resultaten met betrekking tot de afslagpositie samengebracht. Het percentage verschuiving is uitgedrukt ten opzichte van de basiserugging op het niveau van het gehanteerde rekenpeil.

Ook hier zijn de resultaten afhankelijk van de grootte van de golfperiode waarbij de extra afslag natuurlijk toeneemt met de grootte van de golfperiode. Voor hogere perioden (en meer extra afslagvolume) zijn deze ook erg afhankelijk van de vorm van het afslagprofiel en kunnen toenemen tot vele tientallen meters. In de onderstaande figuur is ook de spreiding in de verschuiving opgenomen die samenhangt met de afgeleide onzekerheid in de α -waarde (gebaseerd op de onzekerheid in de afslagtoename).



Figuur 3.30 Relatie tussen golfperiode en afslagtoename per beschouwde locatie (uitgaande van $\alpha = 0,95$ inclusief de van toepassing zijde spreiding).

Bij het buiten beschouwing laten van het resultaat voor het referentieprofiel (#00) varieert de extra teruggang tussen de 0 en 10 m met een gemiddelde teruggang van 20 m. De procentuele toename in de verwachtingswaarde van de afslag varieert tussen de 4 en 171 % met een gemiddelde van 38 %. Een en ander is daarbij wederom sterk afhankelijk van de grootte van de golfperiode.

3.7 Consequenties gevoeligheidsanalyse

De conclusie van de gevoeligheidsanalyse is dat de consequenties van het beter kwantificeren van het effect van de langere golfperiode zeker niet verwaarloosbaar zijn. Het effect hiervan komt het meest naar voren op de locaties waar er daadwerkelijk sprake is van een langere golfperiode zoals bijvoorbeeld het geval is voor Noord-Holland en de Waddenkust. In deze gevoeligheidsanalyse neemt voor de als karakteristiek beschouwde locatie de grootte van de afslag toe met een extra afslag tussen 0 en 100 m³/m¹ met een gemiddelde toename van 50 m³/m¹. De procentuele toename in de hoeveelheid afslag varieert tussen de 7 en 23 % met een gemiddelde van 15%. Voor het hogere bereik van de T_p-waarden moet rekening worden gehouden met een afslagtoename van 15 tot 20 %.

Een en ander leidt ook tot het landwaarts verplaatsen van het maatgevende afslagpunt. Deze extra verschuiving varieert normaal gesproken tussen 0 en 20 m, maar kan, afhankelijk van de profielvorm en de robuustheid van de eerste duinregel oplopen tot veel grotere afstanden.

Tabel 3.15 Overzicht resultaat verkennende berekeningen op afslagkarakteristieken (uitgaande van $\alpha = 0,95$).

Effect	Absoluut	Relatief
Afslagvolume	0 tot 100 m ³ /m ¹	7 tot 23 % (gemiddeld 15 %)
Teruggang duinfront	0 tot 20 m (tot 100 m)	5 tot 175 % (gemiddeld 38 %)

In het geval dat er sprake is van een grotere extra teruggang kan het beter in rekening brengen van de toename van de periode ook leiden tot het onder beoordelings- en ontwerp-omstandigheden lokaal falen van de waterkering, waardoor het vereiste veiligheidsniveau niet meer wordt gehaald.

4 Golfoverslag zeedijken

4.1 Inleiding

In 2018 is in het project “Aanloopstudie XBeach WBI” (Deltares/Arcadis, 2018) een verkenning uitgevoerd naar het effect van duinafslag en lange golfontwikkeling op de berekening van golfoverslag over een dijk-in-duin oplossing. De dijk-in-duin oplossing in deze studie werd gekarakteriseerd door een flauwe en ondiepe vooroever en een lage kruinhoogte boven de stormopzet. Op basis van de verkenning is geconcludeerd dat in de huidige methodiek, vooral door het niet meenemen van de ontwikkeling van het laag-frequente (infragravity) deel van het golfspectrum op een flauwe vooroever, het overslagdebiet wordt onderschat.

Als vervolg op de studie in 2018, zijn Deltares en Arcadis door Rijkswaterstaat gevraagd om te onderzoeken of het niet meenemen van de ontwikkeling van het infragravity deel van het golfspectrum in de bestaande methodiek, ook invloed kan hebben op de berekening van golfoverslag op zeedijken met een dieper gelegen voorland en een hoger kruinniveau. Hiervoor zijn twee onderzoeksvragen opgesteld:

- 1 Wat is het verschil in de berekende golfoverslag over een karakteristieke zeedijk als gevolg van het gebruik van een golftransformatiemodel met infragravity componenten, ten opzichte van de huidige aanpak met een golftransformatiemodel zonder infragravity componenten?
- 2 Welke invloed heeft het niveau van de vooroever en het kruinniveau van de dijk op het verschil in berekende golfoverslag?

De onderzoeksvragen worden in dit hoofdstuk beantwoord aan de hand van een analyse van onderlinge verschillen tussen modelresultaten. In deze studie is hiervoor gebruik gemaakt van de hydrodynamische modellen SWAN en XBeach, en het golfoverslagmodel PC-Overslag.

De volledige aanpak van deze studie wordt beschreven in Sectie 4.2. De resultaten met betrekking tot onderzoeksvraag 1 en 2 worden respectievelijk in Sectie 4.3 en 4.4 gegeven. De resultaten worden in Sectie 4.5 besproken in relatie tot die van het project “Aanloopstudie XBeach WBI”, en in Sectie 4.6 worden de conclusies van de studie beschreven.

4.2 Methodologie

De onderzoeksvragen van deze studie worden beantwoord door middel van een onderlinge analyse van golfoverslagberekeningen voor een geschematiseerd dijkprofiel. In deze berekeningen worden parallel twee verschillende hydrodynamische modellen (SWAN en XBeach) gebruikt om golfinformatie te transformeren van diep water naar de teen van de dijk. Golfoverslag over de dijk wordt berekend met het PC-Overslag model op basis van de door SWAN en XBeach berekende hydraulische condities aan de teen van de dijk.

Doordat het XBeach model informatie over het infragravity golfspectrum bevat, en het SWAN model dit niet heeft, wordt verwacht dat de golfhoogte en vooral de golfperiode aan de teen van de dijk in de XBeach berekeningen groter zullen zijn dan in de SWAN berekeningen. Het effect hiervan op het berekende overslagdebiet in PC-Overslag wordt gebruikt om Onderzoeksvraag 1 te beantwoorden.

Onderzoeksvraag 2 wordt beantwoord door variaties aan te brengen in het geschematiseerde dijkprofiel waarbij de vooroever, en daarmee de teen van de dijk, verhoogd wordt, en de kruin van de dijk verlaagd wordt. Voor de nieuwe vooroeverconfiguraties worden SWAN en XBeach simulaties uitgevoerd om condities aan de teen van de dijk te bepalen. Overslag over de (verlaagde) dijk wordt met PC-Overslag berekend.

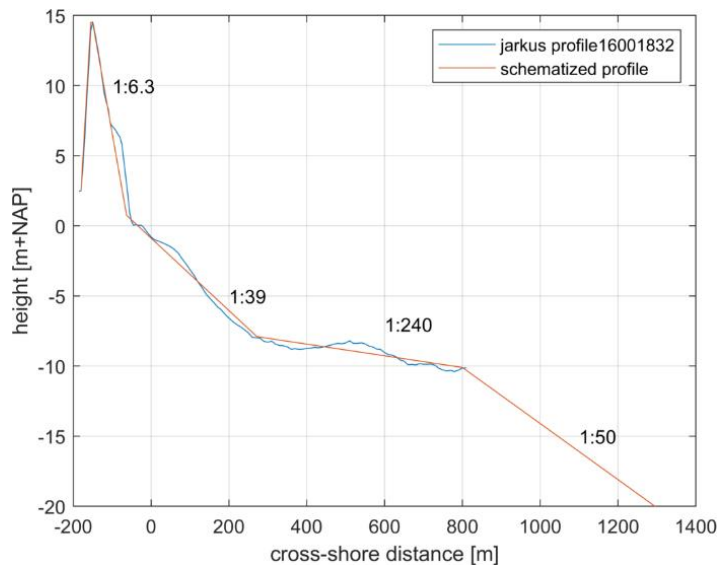
In alle sommen wordt uitgegaan van stationaire diepwater randvoorwaarden, waarbij geen tijdsverloop in de waterstand, golfhoogte of -periode wordt toegepast. Om enkel het gevolg van verschillen in hydrodynamica op golfoverslag te bepalen worden daarnaast de XBeach sommen morfostatisch (zonder bodemontwikkeling) uitgevoerd. Ten slotte wordt om vergelijking tussen de twee hydrodynamische modellen te vereenvoudigen windgroei in SWAN effectief uitgezet (zie Sectie 4.2.3), daar het XBeach model geen windgroei simuleert. Een gedetailleerdere beschrijving van de modellen wordt in de volgende secties gegeven. Hoewel in WBI het DAF (dam en voorlandmodule) model gebruikt wordt om golfcondities vanuit SWAN te transformeren naar de teen van de dijk, wordt in deze studie ter vereenvoudiging alleen SWAN (zonder DAF) gebruikt. Hierin wordt meegenomen dat deze studie zich uitsluitend richt op het bepalen van gevoeligheden voor processen (laag-frequente golfspectrum en overslag). Gezien SWAN en DAF voor dit geschematiseerde dijkprofiel gelijke processen bevatten, vormt deze vereenvoudiging geen beperking op het beantwoorden van de Onderzoeksvragen.

De bovengenoemde vereenvoudigingen en afwijking ten opzichte van de details van de vigerende toets duiden er echter wel op dat de resultaten van deze studie alleen in onderlinge relatieve zin gebruikt kunnen worden. De absolute waarden van berekende overslag kunnen niet representatief worden geacht voor de werkelijke veiligheid van de zeedijk.

4.2.1 Geschematiseerd zeedijkprofiel

In deze studie is gebruik gemaakt van één schematisch dijkprofiel, dat representatief geacht wordt voor Nederlandse zeedijken met een hoge kruin en een relatief diepe vooroever ten opzichte van de voorgaande studie (Deltares/Arcadis, 2018). Het schematische dijkprofiel is gebaseerd op JARKUS-profiel 1832 van Westkappelse Zeedijk tussen Westkapelle en Domburg op Walcheren en het werk van Oosterlo, *et al.* (2018). Het JARKUS-profiel is hierbij geschematiseerd tot een representatief dijkprofiel met een kruinhoogte van NAP + 14,50 m, een zeewaarts talud van 1:6,3, en een teenhoogte van NAP + 0,75 m (Figuur 4.1). De gemeten vooroever is geschematiseerd met twee hellingen: 1:39 van dijkteen tot NAP – 7,90 m, en 1:240 tussen NAP – 7,90 m en NAP – 10,10 m. De zeewaartse grens van het dwarsprofiel is handmatig verdiept met een helling van 1:50 tot een diepte van NAP - 20 m om voldoende waterdiepte te garanderen aan de zeewaartse modelrand van het XBeach model. Het geschematiseerde diepwater profiel is hiermee anders dan de werkelijke situatie op de Zeeuwse voordelta.

Omdat de Westkappelse Zeedijk qua overslag voldoet aan de veiligheidseisen, wordt verwacht dat het berekende overslagdebiet op het referentieprofiel lager zal liggen dan $O(1)$ l/s/m. Om inzicht te geven in het effect van het meenemen van lange golven bij dijken waarbij overslag een kritieke faalmechanisme kan zijn, wordt bij het beantwoorden van Onderzoeksvraag 2 de kruin van het referentieprofiel verlaagd. Hierdoor neemt het berekende overslag toe tot waarden groter dan $O(1-10)$ l/s/m. De geschematiseerde profielen met verlaagde kruin worden in Sectie 4.4 beschreven.



Figuur 4.1 Schematisatie van het JARKUS-profiel tot een representatief dwarsprofiel.

4.2.2 Randvoorwaarden

In deze studie is gebruikt gemaakt van één set hydraulische randvoorwaarden op basis van de Hydraulische Randvoorwaarden Primaire Waterkeringen 2006–2011 (HR2006; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Omdat het XBeach model randvoorwaarden op diep water nodig heeft, en de HR2006 normatieve condities voor JARKUS-raai 1832 alleen geldig zijn ter plaatse van de dijkteen, zijn de HR2006 diepwater golfcondities en waterstanden voor duinraaien dicht gelegen bij het gekozen dijkprofiel gebruik (JARKUS-raaien 1775–1795; Tabel 4.1).

Het gebruik van de randvoorwaarden voor JARKUS-raaien 1775–1795 beïnvloedt niet de onderlinge vergelijking van het berekende overslagdebiet met, en zonder, infragravity component (hoofdonderzoeksvraag). Er moet echter wel worden opgemerkt dat de randvoorwaarden die in deze studie zijn gebruikt, afwijken van de randvoorwaarden die huidig gebruikt worden voor de toetsing van de Westkappelse Zeedijk. Met name de tweederde decimeringshoogte extra in de waterstand die toegepast wordt in de randvoorwaarden voor JARKUS-raaien 1775–1795 (duinen) ten opzichte van JARKUS-raai 1832 (dijk), en het artificieel doortrekken van het diepwaterprofiel tot NAP – 20 m, leiden in deze studie tot lokaal hogere golven bij de teen van de dijk dan in HR2006, en daarmee tot grotere berekende overslagdebieten. De berekende overslagdebieten in deze studie kunnen daarom alleen in relatieve zin geïnterpreteerd worden, en niet als werkelijke toetsing van de veiligheid van de Westkappelse Zeedijk.

In deze studie is aangenomen dat de hoofdgolfrichting normaal op de kust is. Daarnaast is aangenomen dat de spectrale vorm van de golven beschreven kan worden met een JONSWAP-relatie, met een richtingsverspreiding van 17° ($s=20$, binnen het standaardbereik voor extra-tropische stormen; e.g., API 1993) en een frequentie peak-enhancement factor van 3,3.

Tabel 4.1 Diepwater randvoorwaarden op basis van HR2006.

Parameter	Waarde
Waterstand	NAP + 5,3 m
Significante golfhoogte	5,15 m
Piek periode	12,2 s
Golfrichting	0° t.o.v. kustnormaal
Spectrale vorm	JONSWAP
Golfrichtingsspreiding	17°
Peak-enhancement factor (JONSWAP)	3,3 [-]

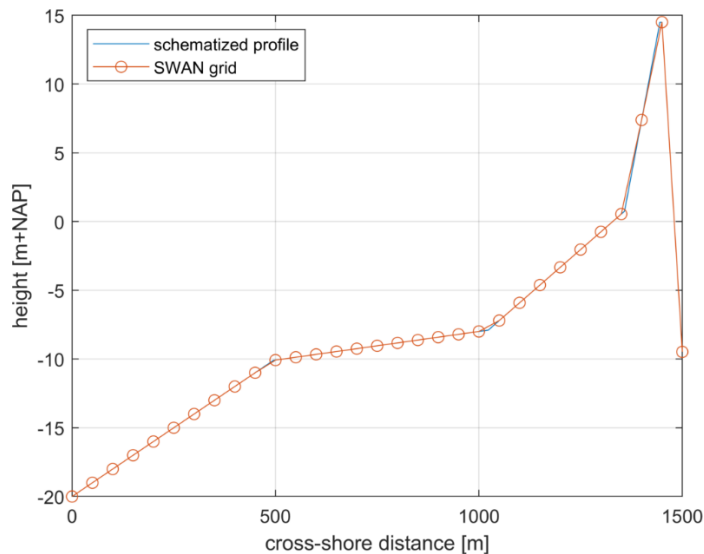
4.2.3 Opzet SWAN model

SWAN (versie 41.01A) is gebruikt om offshore golfinformatie te transformeren naar condities aan de teen van de dijk. Hiervoor is een SWAN rekenrooster opgesteld met een resolutie van 50 m (Figuur 4.2), zoals gebruikelijk in het huidige methodiek. De locatie van de dijkteen wordt bepaald door de eerste natte roostercel bekeken vanuit de dijk. Deze ligt in de schematisatie op 1350m van de zeewaartse modelrand.

Het SWAN model is gedraaid in stationaire modus, met 10° resolutie in de golfrichting en een frequentie rekendomein van 0,03–3,00 Hz (in 49 stappen)¹. De sommen zijn uitgevoerd met 3^e generatie Komen-instellingen, inclusief Komen white-capping, triads (Eldeberky, 1996), quadruplets, default JONSWAP bodemruwheid, default golfbreking, en uitvoer van golfopzet. De dijk is in dit model niet meegenomen als afzonderlijk object, en leidt in het model niet tot reflectie van golfenergie.

Om te voorkomen dat quadruplet-interactie door het SWAN model wordt weggelaten, is een zeer zwakke (0,1 m/s) aanlandige wind opgelegd in de SWAN modellen. Eventuele golfgroei door deze wind is verwaarloosbaar ten opzichte van het effect van golfbreking op de vooroever voor de teen van de dijk.

¹ De laag-frequente golven (tot 0,03Hz) die in SWAN opgelost (zouden kunnen) worden, betreffen zeer lange deininggolven, en behoren tot de primaire golfspectrum. De infragravity golven die in XBeach worden opgelost zijn interactiegolven als gevolg van de primaire spectrum, en worden niet in SWAN opgelost, ondanks de lage frequentieondergrens in de modelinstellingen



Figuur 4.2 SWAN profiel discretisatie.

4.2.4 Opzet XBeach model

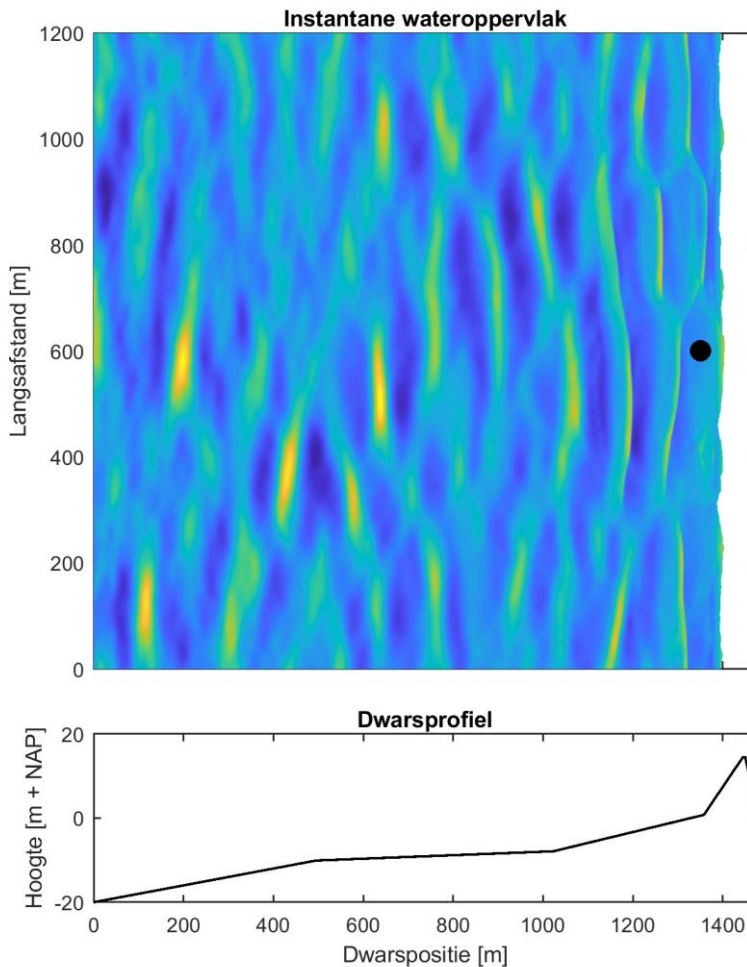
Naar aanleiding van het project “Aanloopstudie XBeach WBI” (Deltares/Arcadis, 2018), wordt in deze studie XBeach (versie 1.23.5526 XBeachX) in niet-hydrostatische modus² gebruikt om de diepwater golfcondities te transformeren naar condities bij de teen van de dijk. In deze modus lost XBeach de oppervlakte-uitwijking en diepte-gemiddelde snelheden van alle individuele golven in de tijdsdomein op. Naast de golven van de primaire windgolf spectrum, welke zowel door XBeach als SWAN worden gesimuleerd, worden in XBeach ook laag-frequente (infragravity) golven berekend. Deze laag-frequente golven ontstaan in de werkelijkheid, en in het model, als gevolg van golfgegroeptheid en breken van de primaire windgolven.

Omdat bekend is dat een 1D (dwarsprofiel) aanpak in XBeach kan leiden tot een verhoogde schatting van de laag-frequente golfhoogte op ondiep water ten opzichte van veldsituaties, is in deze studie gebruik gemaakt van een quasi-2D aanpak. In deze aanpak wordt XBeach als 2DH model gedraaid met langsuniforme bodem. Doordat in deze aanpak golfrichtingsverspreiding meegenomen wordt, zijn de berekende golven niet langkammig (zoals wel het geval in een 1D model of in een gootproef), en komt de berekende laag-frequente golfhoogte beter overeen met de werkelijkheid (e.g., Guza en Fedderson, 2012). Het rekenrooster van deze quasi-2D XBeach modellen is gebaseerd op een criterium van 30-50 roosterpunten per golfengte in de dwarsrichting (variërend van 2,7 m zeewaarts tot 0,5 m op de dijk) om de primaire windgolven goed te beschrijven. In de langsrichting heeft het rekenrooster een totale lengte van 1200 m, met een roosterresolutie van 1,5 m (Figuur 4.3).

De XBeach modellen zijn uitgevoerd met gebruik van het nonh+ model (De Ridder, et al., submitted), en met gebruik van default instellingen voor golfbreking. Bodemwrijving is ingesteld met gebruik van de Manning relaties en een uniform ruwheidscoëfficiënt van 0,016. Om golfreflecties bij de laterale randen te voorkomen, worden cyclische (periodieke) laterale randvoorwaarden gebruikt.

² Dit is de meest rekenintensieve modus van XBeach. Het lost zowel korte als lange golven expliciet op, maar is nog niet goed ontwikkeld en gevalideerd voor sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen.

Omdat het XBeach model in de tijdsdomein rekent, in plaats van spectraal zoals SWAN, worden de XBeach simulaties gedraaid voor 16 uur. Hiermee kan een nauwkeurige schatting gemaakt kan worden van de statistische condities aan de teen van de dijk.



Figuur 4.3 Boven: een instantane bovenaanzicht van het wateroppervlak met niet-langkammige golven (geen langsuniforme golfkammen) in het 2D XBeach NH model. Het zwarte punt geeft de uitvoerlocatie weer voor de teen van de dijk. Onder: het profiel in de dwarsrichting. Binnen de 2D berekening is dit profiel langsuniform herhaald.

4.2.5 Opzet PC-Overslag model

In deze studie wordt PC-Overslag (versie 7.2 MKH) gebruikt om golfoverslag over de dijk te berekenen. Als randvoorwaarden voor het PC-Overslag model worden de berekende inkomende golfcondities (golfhoogte H_{m0} , en golfperiode $T_{m-1,0}$) en waterstand aan de teen van de dijk in de SWAN en XBeach modellen gebruikt. Omdat het PC-Overslag model eventueel gevoelig kan zijn voor de bepaling van de positie van de teen van de dijk, wordt de golfspectrum informatie in beide hydrodynamische modellen op dezelfde locatie (1350 m) bepaald. De gevoeligheid voor variaties in deze positie wordt niet binnen deze studie onderzocht.

De geometrische randvoorwaarden van de dijk worden in PC-Overslag opgegeven aan de hand van het geschematiseerde dijkprofiel (met eventuele kruiverlaging). In de PC-Overslag berekeningen zijn geen reductiefactoren (e.g., ruwheid talud, hoek van golfinval, aanwezigheid berm of muur) toegepast.

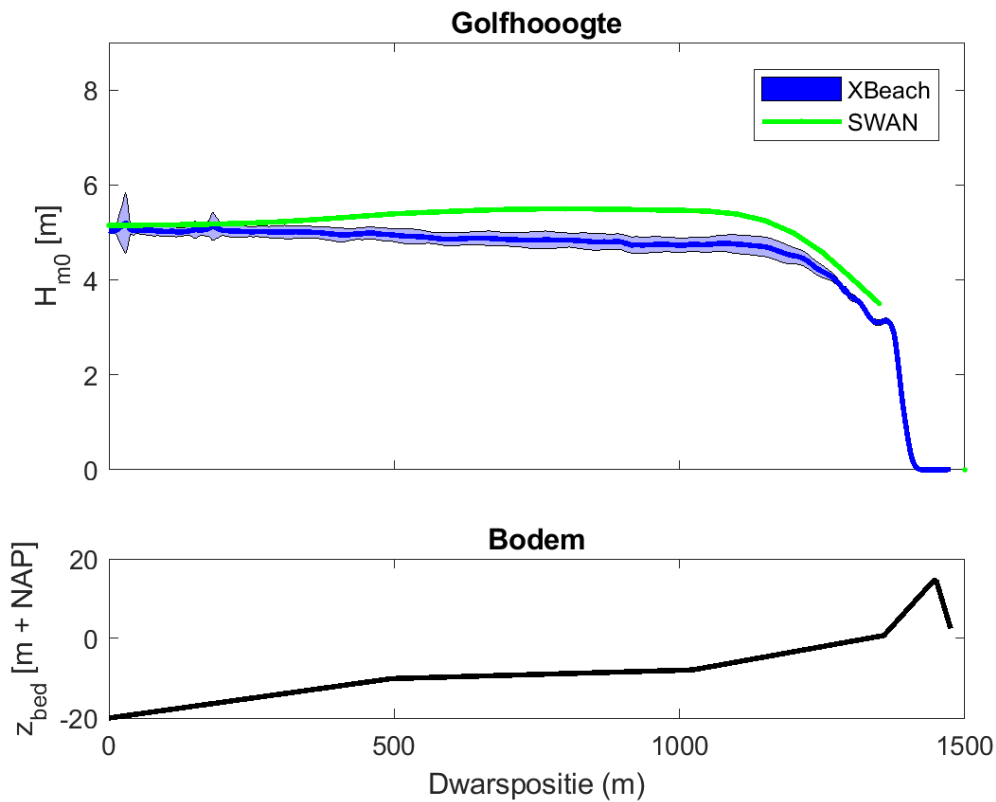
Inkomende golfcondities (H_{m0} en $T_{m-1,0}$) en golfopzet voor het PC-Overslag model zijn rechtstreeks onttrokken uit de SWAN modellen op 1.350 m dwarsafstand. In het geval van XBeach is dit niet mogelijk omdat het model niet spectraal rekent, en de golfcondities aan de teen van de dijk een sommatie zijn van inkomende en gereflecteerde golven. Daarvoor in plaats zijn tijdseries van oppervlakte-uitwijking en diepte-gemiddelde dwarssnelheid op 1350 m dwarsafstand in de centrale raai in het XBeach model uitgevoerd, welke op basis van de methode van Guza (1984) zijn gescheiden in inkomende en uitgaande golfsignalen. Op basis van het inkomend signaal zijn golfkarakteristieken aan de teen berekend uit geconstrueerde spectra over 4 blokken van 4 uur, en over de 4 blokken gemiddeld. De laagfrequente afkapfrequentie waarboven spectrale momenten worden berekend is 1/200 Hz (cf. Oosterlo, *et al.*, 2018).

4.3 Resultaten onderzoeksvraag 1

Een globale vergelijking van het golfhoogteverloop tussen SWAN en XBeach is bepaald over het hele dwarsprofiel. Hiervoor is de significante golfhoogte uitgevoerd door SWAN vergeleken met de variantie in de oppervlakteuitwijking van de XBeach sommen via:

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{\text{var}(\eta)}$$

Met $\text{var}(\eta)$ de variantie van de oppervlakteuitwijking. Figuur 4.4 plot de berekende totale significante golfhoogte voor beide hydrodynamische modellen. Hierbij moet worden opgemerkt dat beide modellen met standaardinstellingen zijn gedraaid, en er geen kalibratie van golfbreker- en bodemwrijvingsparameters heeft plaatsgevonden. Als het verloop van de gemiddelden wordt vergeleken, valt op dat in de SWAN resultaten, golven bij ~200 m dwarsrichting beginnen te shoalen, terwijl (meer beperkte) shoaling in XBeach pas plaatsvindt bij ~1100 m dwarsrichting. De reden voor dit verschil is niet verder onderzocht. Door het verschil in shoaling groeien de golven in SWAN meer dan in XBeach, en begint golfbreking in SWAN eerder dan in de XBeach sommen. Hoewel door golfbreking het verschil in golfhoogte tussen SWAN en XBeach kleiner wordt, blijft de golfhoogte in SWAN bij de teen van de dijk groter dan in XBeach (Tabel 4.2).



Figuur 4.4 Vergelijking van significante golfhoogteontwikkeling over het dwarsprofiel tussen SWAN en XBeach. De bandbreedte rond de XBeach sommen geeft de standaardafwijking van de significante golfhoogte weer, berekend over tijdblokken van 30 minuten.

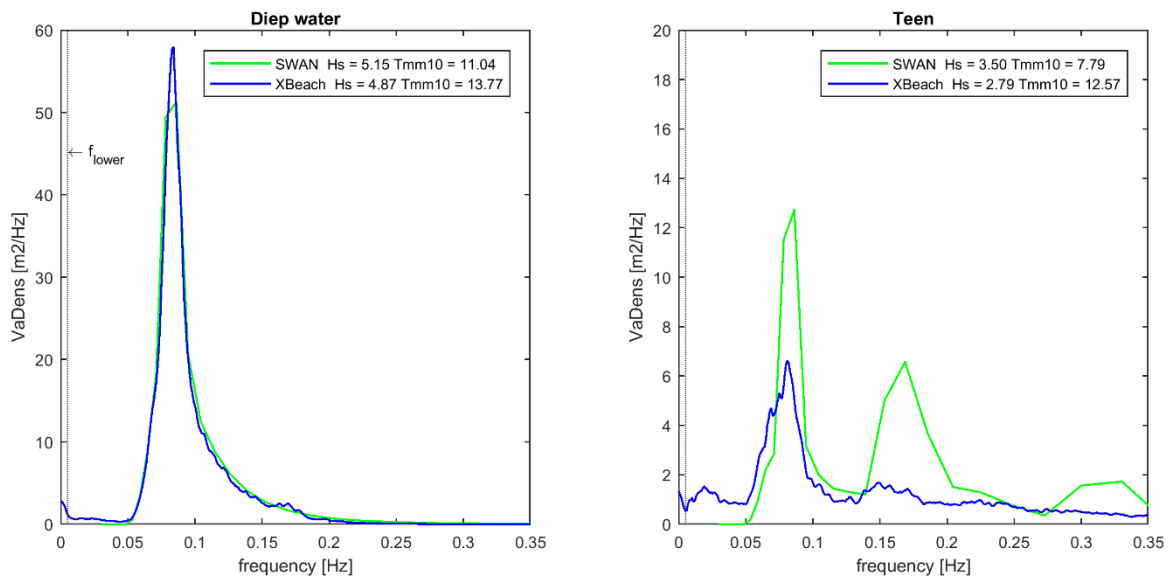
Tabel 4.2 Golfstatistieken bij de teen van de dijk (1350 m) en berekende overslag volumes (in l/s/m). De spectrale karakteristieken voor de XBeach sommen zijn berekend op basis van alleen de inkomende component. Overslagdebieten kleiner dan 0,03 l/s/m worden grijs en tussen haakjes weergegeven, daar zij effectief als "nul" overslagdebiet gezien kunnen worden (EurOtop, 2018).

	SWAN	XBeach
H_{m0} [m] inkomend teen dijk	3.5	2.8
$T_{m-1,0}$ [s] inkomend teen dijk	7.8	12.6
Waterstand teen dijk [m + NAP]	5.4	5.4
Berekende PC-Overslag volume [l/s/m]	(0.00367)	0.304

In Tabel 4.2 geeft naast een verschil in golfhoogte, ook een verschil in golfperiode $T_{m-1,0}$ bij de teen van de dijk aan. Om inzichtelijk te maken waar het verschil in gemiddelde golfperiode tussen de twee modellen vandaan komt, zijn de spectra vergeleken op twee punten in het dwarsprofiel: op 50 meter van de zeewaartse rand en op 1.350 m, zie Figuur 4.5. Op het zeewaartse punt (linker figuur) zijn de spectra in de twee modelaanpakken gelijkvormig voor de primaire (wind- en deinings-) golven in het frequentiebereik 0,05–0,30 Hz. In XBeach is echter een laag-frequente bijdrage zichtbaar, waardoor de golfperiode $T_{m-1,0}$ al op diep water verschilt van die van SWAN. Er moet hierbij worden opgemerkt dat gegeven de grote richtingsverspreiding op de zeewaartse rand, en de beperkingen van de methode van Guza (1984) om golven te scheiden in richtings-gespreide zeeën, het golfspectrum van XBeach op diep

water bepaald is op basis van het totale golfsignaal, in plaats van op basis van alleen het inkomende signaal.

Bij de teen van de dijk (Figuur 4.5, rechts) nemen de verschillen tussen SWAN en XBeach toe. In het hoog-frequente deel van het spectrum neemt in SWAN door triad-interacties de energie toe van de hoger-harmonische componenten van de primaire golven (~0,17 en 0,34 Hz), welke in het XBeach spectrum in veel mindere mate zichtbaar is. Deze secundaire piek trekt de gemiddelde frequentie voor de SWAN berekening omhoog ten opzichte van de XBeach berekeningen. Het SWAN spectrum heeft daarnaast geen energie lager dan 0,05Hz, terwijl XBeach, berekend op basis van het inkomend signaal, een redelijk uniforme verdeling van energie weergeeft over het interval 0,005-0,05 Hz. Als met een laagdoorlaatheidsfilter alleen de significante langegolfhoogte wordt berekend, valt op dat toch een aanzienlijk deel, ~10 % van de energie, van het totale spectrum van XBeach op ondiep water laagfrequent is. Door deze laag-frequente energie neemt de gemiddelde frequentie voor de XBeach berekening omlaag ten opzichte van de SWAN berekeningen.



Figuur 4.5 Vergelijking van de spectrale vorm tussen de drie modelaanpakken op 50 meter vanaf de zeewaartse rand (links) en op de teen van de dijk op 1350m vanaf de zeewaartse rand (rechts). Energie op frequenties kleiner dan f_{lower} (0,005 Hz) worden niet gebruikt voor de berekening van spectrale componenten.

De gevolgen voor het berekende overslagvolume in PC-Overslag op basis van de SWAN en XBeach condities bij de teen zijn in Tabel 4.2 weergegeven. Hoewel de inkomende golfhoogte in de SWAN berekening groter is dan in XBeach bij de teen van de dijk, is het berekende overslagdebiet met PC-Overslag kleiner voor de SWAN condities dan voor de XBeach condities door het verschil in berekende golfperioden. Het relatieve verschil in overslag in deze simulaties is significant (factor O(100)), maar blijft in absolute zin klein met berekende overslagdebieten O(0,001 l/s/m) op basis van de SWAN condities en O(0,1 l/s/m) op basis van de XBeach condities. De verschillen zijn dus significant, maar niet belangrijk in dit geval. Voor andere dijkconfiguraties kan het verschil wel significant en belangrijk zijn.

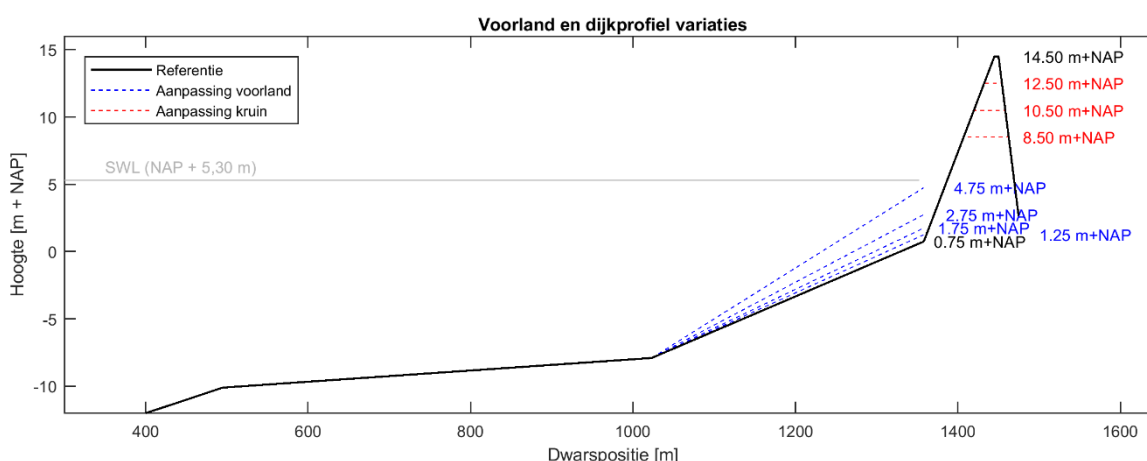
Hoewel een directe vergelijking tussen het berekende overslagdebiet door PC-Overslag op basis van de XBeach condities aan de teen van de dijk, en het rechtstreeks door XBeach via de gemodelleerde vergelijkingen berekende overslagdebiet over de dijk wenselijk is, is dit niet

valide mogelijk binnen de bekende beperkingen van het XBeach model. Uit eerder onderzoek van Roelvink, et al. (2018) is bekend dat het XBeach model zelf het overslagdebiet onderschat voor kleine waarden van overslag (<10 l/s/m). Deze observatie is in lijn met de simulatie in deze studie, waarbij gedurende de totale XBeach simulatie van 32 uur geen overslag intern door XBeach is berekend over de kruin van de dijk.

4.4 Resultaten onderzoeksvraag 2

Om de invloed van de diepte van de vooroever en de hoogte van de kruin van de dijk op de berekening van het overslagdebiet te bepalen is het schematische dijkprofiel van onderzoeksvraag (het "referentieprofiel") op twee manieren aangepast. Om het effect van de diepte van het voorland op de hydrodynamica aan de teen van de dijk te bepalen is de teen van de dijk verhoogd met 0,50 m, 1,00 m, 2,00 m, en 4,00 m en het voorland boven NAP – 7,90 m versteild (blauwe lijnen in Figuur 4.6). De helling van het voorland voor de teen van de dijk versteilt hiermee van 1:39 (referentieprofiel) tot maximaal 1:27 (verhoging van 4,00 m). De Iribarren parameter voor het voorland ($\xi_0 = \tan(\beta_{\text{voorland}}) / \sqrt{H_0/L_0}$) verandert daarmee van 0,17 (referentieprofiel) tot maximaal 0,25 (verhoging van 4,00 m), maar blijft in alle gevallen ruim binnen het bereik voor *surging breakers* ($\xi_0 < 0,5$). Het effect van de hellingsverandering op de golven wordt daarom relatief klein geschat ten opzichte van het effect van de verandering van de waterdiepte bij de teen.

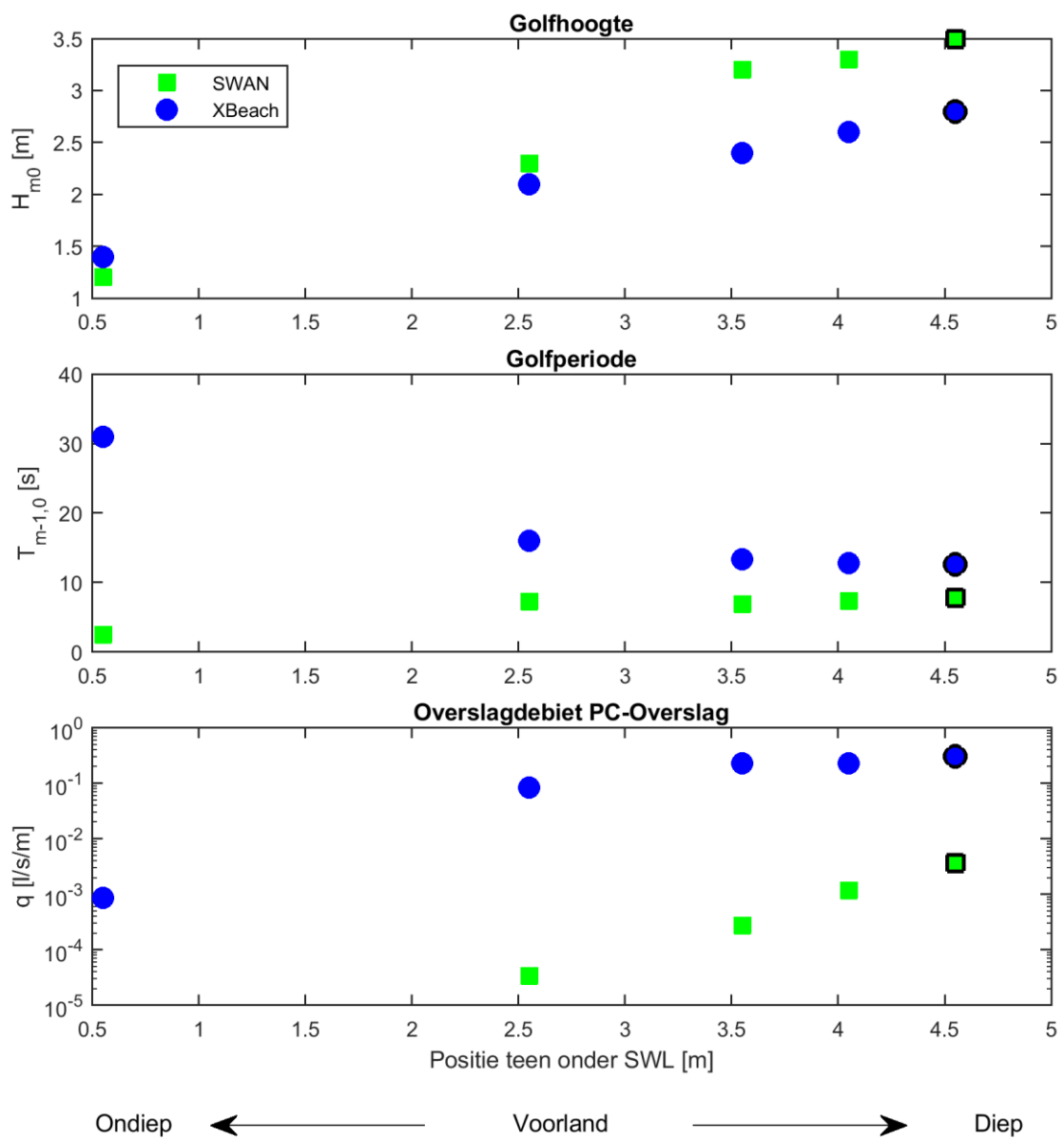
De waterdiepte aan de teen van de dijk ten opzichte van de waterstand op diep water (still water level; SWL) is daarmee 4,55 m voor het referentieprofiel, en 4,05 m, 3,55 m, 2,55 m, en 0,55 m voor de voorlandvarianties. Daarnaast is voor alle combinaties voorland, ook de kruin van de dijk verlaagd met 2,00 m (kruinhoogte NAP + 12.50 m), 4,00 m (NAP + 10.50 m), en 6,00 m (NAP + 8.50 m), zie rode lijnen in Figuur 4.6. De hydrodynamica aan de teen van de dijk zijn voor deze voorlanden opnieuw bepaald door middel van SWAN en XBeach simulaties. Het overslagdebiet voor alle voorland en kruinhoogte combinaties is opnieuw met PC-Overslag bepaald.



Figuur 4.6 Variaties van het schematische referentieprofiel met verhoogde voorlanden (blauwe lijnen en teenpositie t.o.v. NAP in blauw) en verlaagde kruin (rode lijnen en kruinpositie t.o.v. NAP in rood). Ter verduidelijking is het dijkprofiel (met kruinverlagingen) alleen volledig weergegeven in combinatie met het referentievoorland; in de simulaties met een verhoogd voorland sluit het (referentie en verlaagde) dijkprofiel direct aan op het verhoogde voorland.

4.4.1 Analyse diepte voorland

Figuur 4.7 (bovenste twee figuren) toont de berekende golfhoogte en -periode in de SWAN en XBeach simulaties met verschillende voorlandprofielen, weergegeven als functie van de positie van de teen van de dijk ten opzichte van de waterstand op diep water. Het figuur laat voor beide modellen een afname van de golfhoogte aan de teen zien bij hogere voorlanden. Hierbij neemt de golfhoogte in SWAN relatief sneller af dan in XBeach, mogelijk door een grotere verschuiving naar laag-frequente golven in het XBeach model. De golfperiode aan de teen neemt daarentegen in SWAN voor ondiepere voorlanden af (van 7,8 s naar 2,5 s, zie ook Tabel 4.3), terwijl deze periode in XBeach voor ondiepere voorlanden toeneemt (van 12,6 s naar 31,0 s; Tabel 4.3).



Figuur 4.7 Spectrale golfparameters aan de teen van de dijk en berekende overslagdebieten in PC-Overslag voor simulaties met verschillende posities van de teen van de dijk en een dijkkruin op NAP + 14,50 m. De resultaten van de simulaties van Onderzoeksvraag 1 (met een diep voorland) zijn in bovenstaande figuren zwart omringd.

Tabel 4.3 Golfstatistieken bij de teen van de dijk (1350 m) en berekende overslagdebieten voor verschillende voorlandconfiguraties. De spectrale karakteristieken voor de XBeach sommen zijn berekend op basis van alleen het inkomende component. Overslagdebieten kleiner dan 0,03 l/s/m worden grijs en tussen haakjes weergegeven, daar zij effectief als "nul" overslagdebiet gezien kunnen worden (EurOtop, 2018). De resultaten in de bovenste twee rijen komen overeen met de resultaten van de simulaties van Onderzoeksvraag 1.

Positie van de teen onder SWL [m]	Model	H _{m0} [m] inkomend teen dijk	T _{m-1,0} [s] inkomend teen dijk	Waterstand teen dijk (variatie door golfopzet) [m + NAP]	Berekende PC-Overslag volume [l/s/m]	Relatieve verschil overslag [-]	Absolute verschil overslag [l/s/m]
4,55 (diep voorland)	SWAN	3,5	7,8	5,4	(0,00367)	82,8	0,300
	XBeach	2,8	12,6	5,4	0,304		
4,05	SWAN	3,3	7,4	5,5	(0,00119)	189	0,224
	XBeach	2,6	12,8	5,4	0,225		
3,55	SWAN	3,2	6,9	5,5	(0,000275)	82,2	0,226
	XBeach	2,4	13,3	5,5	0,226		
2,55	SWAN	2,3	7,3	5,6	(0,0000345)	2450	0,0845
	XBeach	2,1	16,0	5,5	0,0845		
0,55 (ondiep voorland)	SWAN	1,2	2,5	5,7	0,00	-	(0,000859)
	XBeach	1,4	31,0	5,7	(0,000859)		

De gevolgen van de variaties in het voorland voor het berekende overslagdebiet over de referentiedijk met kruin op NAP + 14,50 m is weergegeven in Figuur 4.7 (onderste figuur) en opgesomd in Tabel 4.3. De resultaten laten zien dat, net als bij de resultaten van onderzoeksvraag 1, de berekende overslagdebieten op basis van de XBeach condities aan de teen van de dijk groter zijn dan die op basis van SWAN condities. Voor de resultaten van beide modellen geldt dat het overslagdebiet afneemt met afnemende waterdiepte aan de teen van de dijk. Echter, het overslagdebiet neemt voor de SWAN resultaten sneller af met de waterdiepte aan de teen (reductiefactor O(100) tussen voorlandpositie 4,55 m en 2,55 m onder SWL aan de teen) dan voor de XBeach resultaten (reductiefactor O(1)).

Doordat het overslagdebiet op basis van SWAN condities aan de teen sneller afneemt met het ondieper worden van het voorland, neemt het relatieve verschil in overslagdebiet tussen SWAN en XBeach (ratio tussen XBeach en SWAN overslag) toe voor ondiepere voorlanden (Tabel 4.3, kolom 7). Dit komt kwalitatief overeen met de conclusies van het project "Aanloopstudie XBeach WBI" (Deltares/Arcadis, 2018). Echter, door de toename van het berekende overslagdebiet voor diepere voorlanden, neemt het absolute verschil in overslagdebiet (overslagdebiet XBeach min overslagdebiet SWAN) toe voor diepere voorlanden (Tabel 4.3, kolom 8).

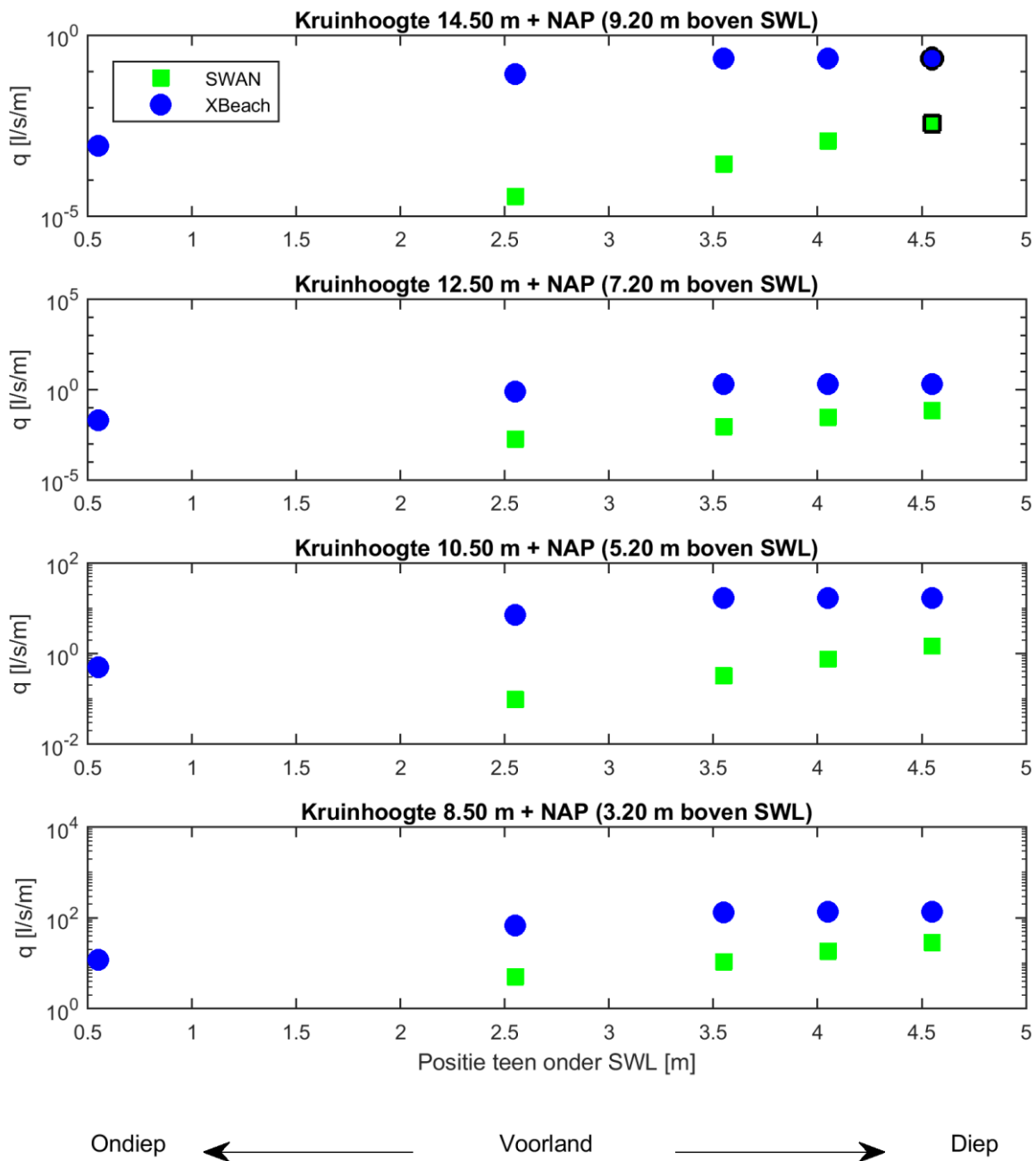
4.4.2 Analyse kruinhoogte en diepte voorland

In de voorgaande analyse (Sectie 4.4.1) is het effect van de diepte van het voorland onderzocht voor een dijk met een relatief hoge kruin ten opzicht van de waterstand en golfcondities (zoals ook het geval is bij de Westkappelse Zeedijk), waardoor relatief weinig overslag berekend

wordt. Om het effect van de diepte van het voorland te onderzoeken op dijken waarvoor overslag een maatgevend faalcriterium kan zijn (e.g., voor overslag van $O(1)$ l/s/m), zijn nieuwe simulaties uitgevoerd waarin de kruinhoogte van de dijk in het PCOverslag model stapsgewijs is verlaagd (zie Figuur 4.6). Door deze verlaging van de kruin (zonder verlaging van waterstand en golfcondities) neemt het berekende overslag toe tot waarden boven 1 l/s/m. De stapsgewijze verlaging van de kruin van de dijk is voor alle voorlandconfiguraties uitgevoerd.

Het berekende overslagdebiet bij gebruik van SWAN en XBeach is voor dijken met variërende kruinhoogtes en voorlandconfiguraties gegeven in Figuur 4.9 en Tabel 4.4. Het figuur laat zien dat de relatieve verschillen (ratio) tussen overslag op basis van XBeach en SWAN resultaten toenemen voor hogere kruinen (relatief gezien ten opzichte van de waterstand en golfcondities), van $O(1-10)$ voor dijken met een lage kruin tot $O(10-1000)$ voor dijken met een hoge kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities. Door toenemende overslagdebieten bij lagere kruinhoogtes (ten opzichte van de waterstand en golfcondities), neemt echter het absolute verschil in overslag op basis van XBeach en SWAN condities toe voor lagere kruinen, van $O(0,001-0,1)$ l/s/m voor dijken met een relatief hoge kruin, tot $O(10-100)$ l/s/m voor dijken met een relatief lage kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities.

Voor alle kruinhoogtes geldt dat het relatieve verschil in het berekende overslagdebiet toeneemt voor ondiepe voorlanden, en het absolute verschil toeneemt voor diepe voorlanden. Dit komt overeen met de bevindingen van Sectie 4.4.1 voor een dijk met een relatief hoge kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities.



Figuur 4.8 Berekende overslagdebieten op basis van SWAN en XBeach resultaten voor verschillende voorlandconfiguraties en kruinhoogten. De resultaten in het bovenste figuur komen overeen met die in Figuur 4.7 (Sectie 4.4.1; Analyse diepte voorland). Daarin zijn de resultaten van de simulaties van Onderzoeksvraag 1 (met een diep voorland) zwart omringd.

Tabel 4.4 Berekende overslagdebieten (in l/s/m) voor verschillende voorlandconfiguraties en kruinhoogtes. De spectrale karakteristieken voor de XBeach sommen zijn berekend op basis van alleen de inkomende component. Overslagdebieten kleiner dan 0,03 l/s/m worden grijs en tussen haakjes weergegeven, daar zij effectief als “nul” overslagdebiet gezien kunnen worden (EurOtop, 2018).

Positie van de teen onder SWL [m]	Model	Kruinhoogte [m + NAP] (hoogte boven SWL [m])			
		14,50 (9,20)	12,50 (7,20)	10,50 (5,20)	8,50 (3,20)
4,55 (diep voorland)	SWAN	(0,00367)	0,0729	1,45	28,8
	XBeach	0,224	2,01	16,7	138
4,05	SWAN	(0,00119)	(0,0298)	0,748	18,8
	XBeach	0,225	2,03	16,7	138
3,55	SWAN	(0,000275)	(0,00939)	0,321	11,0
	XBeach	0,226	2,09	17,1	133
2,55	SWAN	(0,0000345)	(0,00183)	0,0967	5,12
	XBeach	0,0845	0,784	7,28	67,6
0,55 (ondiep voorland)	SWAN	0,00	0,00	0,00	0,00
	XBeach	(0,000859)	(0,0207)	0,500	12,0

4.5 Discussie

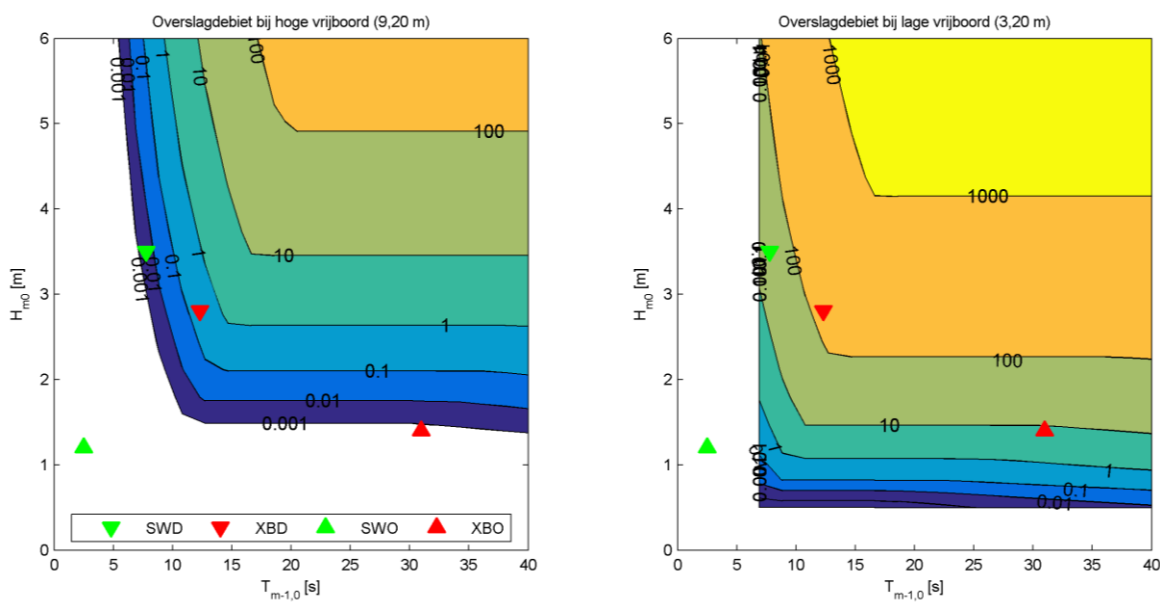
De resultaten van deze studie laten zien dat aanzienlijke verschillen ($O(0,1)$ l/s/m) in het berekende overslagdebiet kunnen ontstaan op dijken met een diepe teen en hoge kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities, bij gebruik van XBeach als hydrodynamisch model in plaats van SWAN, in combinatie met PC-Overslag als overslagmodel. Dit verschil neemt toe tot $O(100)$ l/s/m voor dijken met een relatief lage kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities. Deze resultaten worden ondersteund door eerder fysiek onderzoek in een golfgoet waarin is aangetoond dat het wel of niet meenemen van laag-frequente golfenergie in de bepaling van de condities aan de teen van de dijk, van invloed is op de hoeveelheid berekend golfoverslag over dijken (WL Delft Hydraulics, 1999). Hoewel de relatieve verschillen (ratio) in overslag afnemen voor dijken met een diep voorland, neemt het absolute verschil in berekend overslagdebiet in deze situaties toe (in deze studie $O(0,1-10)$ l/s/m) tot waarden die relevant zijn voor de toetsing van zeedijken. Deze resultaten ontkrachten daarmee de hypothese van het project “Aanloopstudie XBeach WBI” (Deltares/Arcadis, 2018) dat het effect van het verdisconteren van de lange golf alleen belangrijk is voor dijkprofielen met een flauwe vooroever en een lage kruin.

Om de gevoeligheid van het PC-Overslag model voor hydrodynamische condities aan de teen van de dijk inzichtelijk te maken, is in Figuur 4.9 een overslagrelatie als functie van golfperiode en golfhoogte weergegeven voor het dijkprofiel van deze studie met twee verschillende kruinhoogtes. Voor alle (fictieve) combinaties van golfhoogte en -periode aan de teen van de dijk is het overslagdebiet in PC-Overslag bepaald, en aan de hand van een kleurencontour aangegeven in het figuur. Het figuur laat ter referentie ook de in deze studie bepaalde golfcondities in SWAN (groen) en XBeach (rood) zien voor de situatie met een diepe (\blacktriangledown) en ondiepe (\blacktriangle) teen.

Figuur 4.9 laat zien dat de relaties in PC-Overslag in bepaalde gebieden zeer gevoelig zijn voor variaties in de golfperiode (e.g., bij $T_{m-1,0} = 8-12$ s in het linker figuur liggen de contourlijnen dicht op elkaar). Deze gevoeligheid neemt in absolute zin toe bij toenemende golfhoogte (contourlijnen komen dicht bij elkaar). Dit heeft tot gevolg dat in de referentiesituatie met een

diepe teen, er meer overslag berekend wordt op basis van de XBeach condities, ondanks de grotere golfhoogte in de SWAN resultaten en een slechts “beperkte” (~60%) toename van de golfperiode. Hierbij moet worden opgemerkt dat de golfcondities in de referentiesituatie binnen het normale toepassingsbereik van PC-Overslag vallen, en dat deze bevinding daarom waarschijnlijk niet het gevolg is van een “modelartefact” van PC-Overslag. In de situatie met een ondiepe teen, neemt het overslagdebiet in absolute zin daarentegen weinig toe, ondanks een veel grotere toename in de golfperiode (~1100%) en een beperkte toename in de golfhoogte in XBeach ten opzichte van SWAN. Omdat de golfcondities in de situatie met een ondiepe teen weinig toegepast zijn met PC-Overslag, kan niet met zekerheid worden gesteld dat deze relatieve ongevoeligheid fysisch correct is.

Deze resultaten wijzen erop dat hoewel de bijdrage van laag-frequente golven belangrijk is voor het bepalen van de golfperiode bij de teen van de dijk, een grote relatieve bijdrage van lange golven aan het golfspectrum niet noodzakelijk tot een groot verschil in berekend golfoverslag leidt. De gevolgen van het wel of niet verdisconteren van laag-frequente golven in golfloopberekeningen hangt daarvan in plaats vooral af van de (lokale) gevoeligheid van PC-Overslag voor veranderingen in golfperiode en -hoogte. Figuur 4.9 (rechts) laat daarbij zien dat het gebied waarin PC-Overslag gevoelig is voor de golfcondities afhankelijk is van de hoogte van de kruin (in relatie tot de waterstand en golfcondities), en mogelijk ook andere niet-onderzochte parameters (e.g., helling dijktalud, ruwheid, berm, etc.). De verhouding tussen laag- en hoog-frequente energie aan de teen van de dijk is daarom op zichzelf geen goede maat om te bepalen waar verschillen tussen de huidige methodologie met SWAN en een methodologie met XBeach, allebei in combinatie met PC-Overslag, zullen ontstaan.



Figuur 4.9 Berekende overslagdebiet ($l/s/m$) als functie van golfperiode en -hoogte voor een dijk met een hoge kruin (links; kruin 9,20 m boven SWL) en lage kruin (rechts; kruin 3,20 m boven SWL). De berekende golfcondities aan de teen van de dijk (Sectie 4.4.2) voor een voorland met een diepe teen (\blacktriangledown ; SWL - 4,55 m) en een ondiepe teen (\blacktriangle ; SWL - 0,55 m) met gebruik van SWAN (groen) en XBeach (rood) zijn ter illustratie toegevoegd aan de figuren. NB. door het afwijken van de golfopzet in dit figuur ten opzichte van de simulaties in Sectie 4.4.2, komen berekende overslagdebieten niet precies overeen met Tabel 4.4.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Periode-effect Deltagootproeven

In hoofdstuk 2 is een analyse gemaakt van mogelijke verklaringen van verschillen tussen de in 2006 uitgevoerde Deltagootproeven en de XBeach berekeningen die in 2018 gemaakt zijn.

Uit de analyse blijkt dat in XBeach en in het golfschotsturingsprogramma vrijwel dezelfde implementatie van de theorie voor gebonden lange golftheorie is gebruikt (Herbers et al, 1994) en de verschillen niet verklaren. Opgemerkt wordt dat de theorie een groot verschil laat zien tussen de gebonden lange golfenergie voor situaties zonder richtings spreiding (duidelijk minder) en situaties met richtings spreiding (duidelijk meer). Bij de gootproeven en de bijbehorende berekeningen is geen richtings spreiding aanwezig en is de mate van gebonden lange golf energie volgens de gebruikte theorie dus relatief hoog ten opzichte van wat in de praktijk verwacht mag worden.

Uit de analyse van de golfschotstuursignalen blijkt dat een deel van de gebonden lange golf energie die volgens de theorie aanwezig zou moeten zijn, om achteraf verklaarbare redenen niet opgewekt is. Dit is vooral gedaan vanwege de beperking van de slag van het golfschot waardoor zeer lange golven niet opgewekt kunnen worden. Deze beperking heeft geleid tot een ondergrens aan de opgewekte golffrequentie van 0,02 Hz (d.w.z. gebonden lange golven langer dan 50 seconden op modelschaal en langer dan ongeveer 122 seconden op prototype schaal) zijn niet opgewekt in Proef T01 en T02, resulterend in een onderschatting van de gebonden lange golfenergie van respectievelijk 13% en 18%. In Proef T03 is helemaal geen gebonden lange golf energie opgewekt (omdat er geen deel van de slag van het golfschot over was om gebonden lange golf energie op te wekken).

De opgewekte kortegolfgroepen verwachten volgens de fysica een meelopende gebonden lange golf. Omdat deze niet (of onvoldoende) door het schot wordt opgewekt past de beweging van het golfschot niet geheel met de waterbeweging in de goot. Hierdoor ontstaan aan het schot stoorgolven met lage frequenties die lokaal in fase of tegenfase zijn met de gebonden lange golven en deze uitdoven of versterken in amplitude. Voor de laagste golffrequenties blijven de gebonden golven op grote lengte (groter dan de gootlengte) nagenoeg uit fase met de vrije golven en doven ze elkaar uit en zijn niet zichtbaar in het meetsignaal. In de meetsignalen van de gootproeven kunnen deze stoorgolven daarom niet worden waargenomen. Dit verklaart dat de gemeten lange golfhoogte kleiner is dan theoretisch verwacht. Dit effect wordt groter met toenemende golfperiode (van proef T01 naar T03) en is voor de proef met de langste periode (T03) het grootst omdat daar helemaal geen gebonden lang-golf energie is opgewekt. De mogelijke invloed van de niet gemeten stoorgolven op duinslag is moeilijk te bepalen.

De keuze van de diepte waarop de randvoorwaarden worden opgelegd heeft invloed op de berekende gebonden lange golfenergie en daardoor op het lange golfgedrag en op de afslag. Als XBeach aangestuurd wordt op 4,5 meter waterdiepte worden de gemeten lange golven voor proeven T02 en T03 overschat en is ook de grootste trend te zien in de afslag. Als de offshore waterdiepte verlegd wordt naar dieper water zien we een gematigder trend in de afslag.

In zowel XBeach als in de golfschotsturing is de gebruikte theorie voor het bepalen van de gebonden lange golven nagenoeg hetzelfde. Echter, de toepassing van de gebruikte theorie op relatief ondiep water houdt wel impliciet een aanname in dat de waterdiepte “zeewaarts” van het golfschot gelijk is aan de waterdiepte aan het schot. Met name voor de proeven met de langste golfperiode houdt dit in dat de zee (d.w.z. de bodemligging zeewaarts van de golfschotlocatie) relatief heel ondiep wordt geacht, wat niet overeenkomt met de realiteit.

De toepassing van de gebruikte theorie geeft bij de toegepaste kleine waterdiepte dus een overschatting van de gebonden lange golf energie. Bij de gootproeven is de daadwerkelijke overschatting niet aanwezig (of is er zelfs een onderschatting) omdat de beperking van de slag veroorzaakt dat er minder gebonden lange golven worden opgewekt. In tegenstelling tot de gootproeven kan bij numerieke berekeningen de startdiepte groter worden gemaakt zodat de golven zich in het domein kunnen ontwikkelen. Daardoor is de hoeveelheid lange golf energie realistischer bij een startdiepte op dieper water en is de trend in de afslag gematigder. Vanuit modelleerperspectief geniet de variant waarbij gebonden golven op dieper water worden opgelegd dan ook de voorkeur. Bij deze variant houdt de trend in de afslag het midden tussen de metingen en de berekende waarde bij kleinere randvoorwaardediepte.

5.2 Consequenties voor beoordeling en ontwerp

Op basis van bestaande en nieuwe modelberekeningen en her-analyse van de in 2006 uitgevoerde Deltagoot-metingen zijn er indicaties dat de rol van lange golven groter is dan voorheen is aangenomen. Het beschikbaar komen van het XBeach-model heeft hierin een belangrijke rol gespeeld en dankzij dit model kon deze problematiek worden geduid.

De consequentie is dat er meer duinafslag zou kunnen optreden bij lange golfperiodes zoals voorkomen bij de kop van Noord-Holland en de Waddeneilanden. De uit de beschikbare bronnen bepaalde gemiddelde afslagtoename van 46 % voor het interval van 12 naar 18 s geven een indicatie dat de hoeveelheid afslag met gemiddeld 15 tot 20 % (oftewel orde 20 meter extra afslag) kan toenemen ten opzichte van de huidige situatie waarbij nog werd uitgegaan van een afslagtoename van 24 % voor het interval van 12 naar 18 s. Een en ander is natuurlijk erg afhankelijk van de lokaal in rekening te brengen golfperiode.

Het gaat hierbij dus om een vergrotend effect op de hoeveelheid afslag. In het kader van de in Hoofdstuk 2 gepresenteerde uitwerkingen is ook de rol van de richtingsverspreiding aan de orde gekomen. Daarbij is gebleken dat het in rekening brengen van deze spreidingsmaat een reducerend effect heeft op de grootte van de hoeveelheid afslag. In de veelal beschouwde gootproeven is er per definitie geen sprake van richtingsverspreiding. In werkelijkheid aan de kust is dit per definitie natuurlijk wel het geval.

In dat verband verdient het dan ook aanbeveling om de invloed van gebonden lange golven nauwkeuriger te bepalen, waarbij ook het effect van enige richtingsverspreiding (met een reducerend effect op de duinafslag) wordt meegenomen in de geschatte hoeveelheid gebonden lange golf energie.

Gegeven het feit dat de consequenties van de recente inzichten en bovengenoemde analyse belangrijk kunnen zijn, kan vervolgens beoordeeld worden of er voor de beoordelings- en ontwerp-praktijk overgegaan zou moeten worden op een geher-kalibreerd Duros+ model of dat er in wordt overgestapt naar het numerieke model XBeach.

In het eerste geval komt er een nieuwe release van het huidige TRDA2006-instrumentarium beschikbaar waarbij het kernmodel is aangepast via een modificatie van de α -waarde.

De andere optie (het overstappen op de implementatie van het XBeach-model) verdient de voorkeur. De achterliggende argumentatie is in meer detail en is uitgewerkt in het Plan van Aanpak Duininstrumentarium.

5.3 Golfoverslag zeedijken

Naar aanleiding van het project “Aanloopstudie XBeach WBI” (Deltares/Arcadis, 2018) is onderzocht of het niet meenemen van de ontwikkeling van het laag-frequente (infragravity) deel van het golfspectrum in de bestaande methodiek om golfoverslag over dijken te bepalen, invloed kan hebben op de berekening van golfoverslag op zeedijken met een diep voorland en een hoge kruinhoogte. Om dit te bepalen zijn modelstudies uitgevoerd op een schematisch, representatief dijkprofiel met twee hydrodynamische modellen: SWAN (zonder laag-frequente golf ontwikkeling) en XBeach (met laag-frequente golf ontwikkeling). De door SWAN en XBeach berekende condities aan de teen van de dijk zijn gebruikt als invoer voor het PC-Overslag model om overslag over de dijk te berekenen.

De resultaten van deze studie laten zien dat het niet meenemen van de ontwikkeling van laag-frequente golven tot aanzienlijke verschillen ($O(0,1)$ l/s/m) in het berekende overslagdebiet kan leiden op dijken met een diepe teen en hoge kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities. Het verschil ontstaat primair door de gevoeligheid van het PC-Overslag model voor de golfperiode bij bepaalde golfcondities aan de teen van de dijk, in combinatie met een toename van de golfperiode in XBeach door het verdisconteren van laag-frequente golven, en de afname van de golfperiode in SWAN door triad-interacties. Het verschil in het berekende overslagdebiet neemt toe tot $O(100)$ l/s/m voor dijken met een lage kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities (in deze studie gesimuleerd door het verlagen van de kruinhoogte bij behoud van de offshore golfcondities en waterstand). De verschillen kunnen kritiek zijn voor het bepalen van overslag in het bereik 1–10 l/s/m.

Gevoeligheidssimulaties laten zien dat voor alle onderzochte dijk kruinhoogtes, het verschil in overslagdebiet op basis van SWAN en XBeach in relatieve zin toeneemt, maar in absolute zin afneemt, bij afnemende waterdiepte bij de teen van de dijk. Dit betekent dat het correct representeren van het golfspectrum bij de teen van de dijk voor zowel dijken met een diepe, als ondiepe vooroever van belang is.

Het verschil in overslagdebiet op basis van SWAN en XBeach neemt in relatieve zin toe, en in absolute zin af, met afnemende overslag door golven (in deze studie gesimuleerd door het verhogen van de kruinhoogte bij behoud van de offshore golfcondities en waterstand). Dit betekent dat (alleen) voor dijken met een relatief zeer hoge kruin ten opzichte van de waterstand en golfcondities, het verschil in het berekende overslag kleiner wordt dan het toelaatbare overslagdebiet, en daarmee relatief weinig invloed heeft op de bepaling van de veiligheid van de dijk.

De resultaten van deze studie wijzen er verder op dat een groot verschil in berekende golfperiode aan de teen van de dijk tussen SWAN en XBeach (een maat voor de relatieve bijdrage van de laag-frequente golven) niet noodzakelijk leidt tot een groot verschil in het door PC-Overslag berekend golfoverslagdebiet. Hoewel een toename in golfperiode meestal ook leidt tot een relatieve toename van het overslagdebiet, is het berekende overslag in absolute zin weinig gevoelig voor golfperiode variaties bij lage golfhoogte (~1 m) en voor golfperiode variaties bij zeer lange golven (~ 20 s). Daarvoor in de plaats wordt de gevoeligheid in de berekende overslag vooral bepaald door de (dijk-specifieke) empirische relaties in PC-Overslag, en binnen welke golfregimes deze gevoelig zijn voor verandering in de golfperiode. Voor het referentieprofiel in deze studie is het berekende overslagdebiet zeer gevoelig

gebleken voor golfperiode variaties in het bereik 5–15 s, vanaf een golfhoogte van ~2 m bij de teen. Verder onderzoek naar de betrouwbaarheid van de overslagrelaties in PC-Overslag, met name voor condities met een hoge golfperiode (groot aandeel laag-frevente golven aan het golfspectrum), is nodig om de gevolgen voor de beoordeling van de Nederlandse zeedijken beter te specificeren.

6 Referenties

- Alkyon. (2002). Effect zwaardere golfcondities op duinenkust; Verkenning effect grotere golfhoogte en langere golfperiode op de mate van duinafslag en veiligheid van de duinenkust. Rapport A963R3, september 2002.
- API, 1993: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Structures—Load and Resistance Factor Design. American Petroleum Institute, 225 pp
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists (Vol. 2). World Scientific Publishing Company.
- Deltares/Arcadis (2018). Aanloopstudie XBeach WBI. Deltares Rapport 11202190-001, 12 december 2018.
- Deltares/Arcadis. (2019). Plan van Aanpak XBeach-ontwikkeling ten behoeve van BOI (in voorbereiding).
- Eldeberky, Y., Polnikov, V. and Battjes, J.A., 1996. A statistical approach for modeling triad interactions in dispersive waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(25).
- EurOtop, 2018. *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.* Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.
- ExpertiseNetwerk Waterveiligheid/ENW. (2007). *TRDA2006 Duinafslag, Technisch Rapport Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsen op Veiligheid.*
- Guza, R. T., en F. Feddersen (2012), Effect of wave frequency and directional spread on shoreline runup, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L11607, doi:10.1029/2012GL051959.
- Hasselmann, K. (1962). On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 12(4), 481-500.
- Herbers, T. H. C., Elgar, S., Guza, R. T., & O'Reilly, W. C. (1995). Infragravity-frequency (0.005–0.05 Hz) motions on the shelf. Part II: Free waves. *Journal of physical oceanography*, 25(6), 1063-1079.
- Klopman, G., & Dingemans, M. W. (2001). Wave interactions in the coastal zone. International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 21-25 April 2001, Hiroshima, Japan,
- Longuet-Higgins, M. S., and R.W. Stewart, Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to "surf-beats," *J. Fluid Mech.*, 8, 565– 583, 1962.

- Longuet-Higgins, M. S., and R. W. Stewart, Radiation stress in water waves, a physical discussion with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529–563, 1964.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007. *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006): Bijlage I, bedoeld in artikel 1 van de Regeling veiligheid primaire waterkeringen*. Tech Report
- Oosterlo, P.; McCall, R.T.; Vuik, V.; Hofland, B.; Van der Meer, J.W.; Jonkman, S.N. Probabilistic Assessment of Overtopping of Sea Dikes with Foreshores including Infragravity Waves and Morphological Changes: Westkapelle Case Study. *J. Mar. Sci. Eng.* 2018, 6, 48.
- Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., Dastgheib, A., 2018. Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, 103–123, doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.07.004
- Sand, S. E. (1982). Wave grouping described by bounded long waves. *Ocean Engineering*, 9(6), 567-580.
- Steetzel, H.J. (1993). Cross-shore transport during storm surges. PhD. Thesis Delft University of Technology. September 1993.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/TAW. (1984). Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering.
- Van de Graaff, J. (1984). Probabilistische methoden bij het duinontwerp; Achtergronden van de TAW-leidraad duinafslag. Technische Universiteit Delft.
- Van Dongeren, A., Reniers, A., Battjes, J., & Svendsen, I. (2003). Numerical modeling of infragravity wave response during DELILAH. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C9).
- Van Gent, M.R.A., Van Thiel de Vries, J.S.M., Coeveld, E.M., De Vroeg, J.H., Van de Graaff, J., 2008. Large-scale dune erosion tests to study the effect of wave periods. *Coastal Engineering*. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.04.003.
- Van Thiel de Vries, J. S. M. (2009). Dune erosion during storm surges. PhD thesis, Delft University of Technology
- Vellinga, P. (1986). Beach and dune erosion during storm surges. PhD. Thesis Delft University of Technology. December 1986.
- Waterloopkundig Laboratorium. (1982). Systematisch onderzoek naar kenmerkende factoren voor duinafslag, Verslag modelonderzoek M1819 deel I, december 1982.
- WL|Delft Hydraulics (1999). Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores: 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra. Report H3608, December 1999.
- WL|Delft Hydraulics (2004). Modelonderzoek Duinafslag. Meetverslag kleinschalige gidsproeven. Report H4265, Maart 2004.
- WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft. (2006a). Dune erosion. Product 1: Deterministic dune erosion prediction method. Report H4357, January 2006.

11203720-013-GEO-0002, 10 juli 2019, definitief

WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft. (2006b). Dune erosion. Product 2: Large-scale model tests and dune erosion prediction method. Report H4357, May 2006.

WL Delft Hydraulics/Alkyon/TU Delft. (2007). Dune erosion. Product 3: Probabilistic dune erosion prediction method. Report H4357/A1414, February 2007.